

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DO MANDRILAMENTO DE CILINDROS DE BLOCOS DE MOTORES EM
FERRO FUNDIDO VERMICULAR COM DIFERENTES CONCEPÇÕES DE
FERRAMENTAS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALLAN FREDERICO C. E. GODINHO

FLORIANÓPOLIS, ABRIL DE 2007

ANÁLISE DO MANDRILAMENTO DE CILINDROS DE BLOCOS DE MOTORES EM
FERRO FUNDIDO VERMICULAR COM DIFERENTES CONCEPÇÕES DE
FERRAMENTAS

ALLAN FREDERICO C. E. GODINHO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng. Mec.
Orientador

Prof. Fernando Cabral, Ph.D.
Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr.-Ing.

Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng. Mec.

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng. Mec.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng., pela oportunidade, pelo profissionalismo como professor e orientador, pelos conhecimentos adquiridos, pela troca de experiências, pelo companheirismo e pelo grande incentivo e motivação.

Ao Eng Cássio Luiz Francisco de Andrade, M. Eng. Mec., por disponibilizar equipamentos e pessoal para os ensaios na Tupy Fundições, pelos conhecimentos transmitidos, como também pelo companheirismo.

À UFSC e ao Laboratório de Mecânica de Precisão por toda estrutura e suporte técnico, à Fundições Tupy Ltda pela disponibilidade dos centros de usinagem, corpos de prova e ferramentas, e ao Projeto Verde-Amarelo coordenado pelo Prof. Lourival Boehs que foi o elo de ligação entre a UFSC e a Fundições Tupy proporcionando o desenvolvimento deste trabalho.

Aos estagiários Pedro, Pablo, Bruno e demais companheiros que direta ou indiretamente colaboraram na realização deste trabalho.

Aos meus amigos Helton, Castillo e João por todo companheirismo, amizade, e os bons momentos de LMP.

Aos meus amados pais Diomedes e Ilza, aos meus queridos irmãos e amigos Diomedes Jr., Giovana, Felipe, Alberto, Chieh, Gustavo, Joviano e à minha querida Simone pela motivação e apoio a este trabalho.

A Deus.

*“Mais que máquinas, precisamos de humanidade.
Mais que inteligência, precisamos de afeição e doçura.
Sem essas virtudes a vida será de violência e tudo estará
perdido.”*

Charles Chaplin

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	4
LISTA DE FIGURAS	9
SIMBOLOGIA	13
1 INTRODUÇÃO	17
2 ESTADO DA ARTE.....	22
2.1 Bloco do Motor	22
2.2 Qualidade Geométrica e Dimensional e as Implicações na Seqüência de Usinagem dos Cilindros do Bloco	23
2.3 Caracterização Geométrica e Dimensional de Cilindros de Motores	24
2.3.1 Tolerâncias Dimensional e Geométricas na Qualidade dos Cilindros dos Blocos de Motor.....	27
2.4 O Processo de Corte no Mandrilamento	31
2.4.1 Geometria da Ferramenta.....	31
2.4.2 Força de Usinagem	32
2.4.3 Potência de Usinagem	34
2.5 Desgaste de Ferramentas no Mandrilamento	34
2.5.1 Causas e Mecanismos de Desgaste	34
2.5.2 Formas de Desgaste.....	36
2.6 Materiais para a Fabricação de Bloco de Motor	37
2.6.1 Ferro Fundido Cinzento	38
2.6.2 Ferro Fundido Vermicular	39
2.7 Usinabilidade de Ferros Fundidos	41
2.7.1 Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular	42
2.8 Vida das Ferramentas de Corte	43
2.9 Materiais de Ferramentas de Corte na Usinagem do Ferro Fundido Cinzento e Vermicular.....	45

2.10 Processos de Usinagem de Cilindros com Ferramentas de Corte com Geometria Definida.....	45
2.10.1 Definição de Diferentes Processos	45
2.10.2 Mandrilamento	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	59
3.1 Corpos de Prova	59
3.2 Máquina-ferramenta	60
3.3 Ferramentas de Mandrilar	61
3.3.1 Ferramenta A.....	61
3.3.2 Ferramenta B	62
3.3.3 Ferramenta C	63
3.3.4 Ferramenta D.....	64
3.4 Sistema de Aquisição das Imagens do Desgaste dos Insertos.....	65
3.5 Sistema de Medição	66
3.5.1 Máquina de Medição dos Desvios de Forma.....	66
3.6 Pre-set da Ferramenta.....	70
3.7 Ensaios	71
3.8 Critério de Fim de Vida	73
3.9 Tratamento Estatístico das Medições	73
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	75
4.1 Pré-ensaios	75
4.1.1 Caracterização dos <i>Pallets</i> I e II.....	75
4.2 Análise de Retitude, Circularidade e Cilindricidade	77
4.3 Análise das Curvas de Potência.....	78
4.3.1 Potência x Avanço.....	78
4.3.2 Potência de Usinagem x Geometria	80
4.4 Análise dos Desvios Geométricos.....	82
4.4.1 Considerações	82
4.4.2 Análise dos Resultados de Circularidade	87
4.4.3 Análise dos Resultados de Retitude.....	97

4.4.4	Análise dos Resultados de Cilindricidade.....	105
4.4.5	Análise dos Resultados de Tolerância Dimensional	112
4.5	Análise da Produtividade e da Vida	116
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	118
5.1	Conclusões.....	118
5.1.1	Análise das Curvas de Potência	118
5.1.2	Análise dos Desvios Geométricos	118
5.1.3	Tolerância Dimensional.....	121
5.1.4	Análise da Produtividade e da Vida	122
5.2	Sugestões.....	123
6	REFERÊNCIAS.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Motor, bloco e componentes internos.....	18
Figura 1.2 – Operações de usinagem dos cilindros.....	19
Figura 2.1 – Bloco do motor.....	22
Figura 2.2 – Disposição dos cilindros no bloco	22
Figura 2.3 – Conseqüências dos desvios geométricos e dimensionais na usinagem dos cilindros.....	23
Figura 2.4 – Exemplos de desvios geométricos que os cilindros podem apresentar	25
Figura 2.5 – Desvios geométricos em um cilindro	26
Figura 2.6 – Classificação das especificações geométricas de produto dentro das normas do sistema ISO-GPS	26
Figura 2.7 – Cilindros com diâmetros abaixo (a) e acima (b) da tolerância.....	28
Figura 2.8 – Especificação de tolerância de retitude	28
Figura 2.9 – Exemplos de aplicação da tolerância de retitude	28
Figura 2.10 – Representação do erro de retitude	29
Figura 2.11 – Indicação da tolerância de retitude	29
Figura 2.12 – Desvio de circularidade em um cilindro	29
Figura 2.13 – Representação do desvio de circularidade	29
Figura 2.14 – Especificação de tolerância de paralelismo e aplicação	30
Figura 2.15 – Ilustração do erro de cilindridade	30
Figura 2.16 – Representação da tolerância de cilindridade.....	30
Figura 2.17 – Influência da geometria da ferramenta sobre o processo de usinagem.....	31
Figura 2.18 – Analogia do processo de mandrilamento com o torneamento.....	32
Figura 2.19 – Força de usinagem e suas componentes	32
Figura 2.20 – Componentes da força de usinagem em função do avanço, velocidade de corte	33
Figura 2.21 – Influência do ângulo de saída e do ângulo de inclinação nas componentes das forças de usinagem	34
Figura 2.22 – Causas de desgaste na usinagem	35

Figura 2.23 – Formas de desgaste e grandezas a serem medidas na cunha	37
Figura 2.24 – Microestrutura do ferro fundido cinzento	38
Figura 2.25 – Foto da microestrutura do fofo vermicular.....	40
Figura 2.26 – Operação de mandrilamento.....	47
Figura 2.27 – Concepção original de uma ferramenta de mandrilar	48
Figura 2.28 – Evolução das ferramentas de mandrilar	48
Figura 2.29 – Barra de mandrilar	49
Figura 2.30 – Cabeçote de mandrilar	49
Figura 2.31 – Compensação das forças pelos elementos de guias.....	50
Figura 2.32 – Ferramentas de mandrilar	50
Figura 2.33 – Problema de posicionamento do centro da ferramenta em relação ao centro do pré-furo	51
Figura 2.34 – Deflexão da ferramenta devido ao problema de posicionamento.....	51
Figura 2.35 – Deflexão da ferramenta devido ao desvio geométrico de retitude acima da tolerância	52
Figura 2.36 – Exemplos de ferramentas de mandrilar sem elementos de guia	52
Figura 2.37 – Comportamento da ferramenta sem elementos de guia em peça com desvio de forma de retitude	53
Figura 2.38 – Qualidade da superfície em função do raio do gume e do avanço, como no torneamento	53
Figura 2.39 – Deflexão da ferramenta de ponta única devido à força de usinagem.....	54
Figura 2.40 – Cabeçote de mandrilar com 2 insertos	55
Figura 2.41 – Ferramenta de mandrilar com diâmetros escalonados	57
Figura 3.1 – Bloco v6 utilizado como corpo de prova	59
Figura 3.2 – Centro de usinagem utilizado para a execução dos testes	61
Figura 3.3 – Características construtivas da ferramenta A	62
Figura 3.4 – Características construtivas da ferramenta B	63
Figura 3.5 – Características construtivas da ferramenta C	64
Figura 3.6 – Características construtivas da ferramenta D	65
Figura 3.7 – Equipamentos utilizados para aquisição e medição do desgaste dos insertos	65

Figura 3.8 – Máquina de medição dos desvios de forma.....	66
Figura 3.9 – Posições de medição no cilindro	68
Figura 3.10 – Exemplo para identificar o significado das legendas	69
Figura 3.11 – Representação do gráfico de análise dos resultados de diâmetro.....	70
Figura 3.12 – Identificação e posicionamento dos cilindros no bloco	72
Figura 4.1 – Comparação dos valores dos diâmetros obtidos pelas peças fixadas nos <i>pallets</i> I e II, respectivamente.....	76
Figura 4.2 – Comparação dos valores de retitude e circularidade das peças fixadas nos <i>pallets</i> I e II.....	77
Figura 4.3 – Curvas de potência das ferramentas A e B.....	79
Figura 4.4 – Comparação do raio de quina entre os insertos da ferramenta A e da ferramenta B	81
Figura 4.5 – Fotos dos insertos da ferramenta A	83
Figura 4.6 – Fotos dos insertos da ferramenta B	84
Figura 4.7 – Fotos dos insertos da ferramenta C	85
Figura 4.8 – Fotos dos insertos da ferramenta D	86
Figura 4.9 – Valores de circularidade obtidos pelas ferramentas A e B nas condições de início e fim de vida.....	87
Figura 4.10 – Valores de circularidade obtidos pelas ferramentas C e D nas condições de início e fim de vida	88
Figura 4.11 – Resultados de circularidade em função da variação do avanço	89
Figura 4.12 – Comportamento da circularidade com a variação do avanço na ferramenta D	90
Figura 4.13 – Comportamento da circularidade em função da velocidade de corte.....	92
Figura 4.14 – Valores de circularidade na condição de início de vida	93
Figura 4.15 – Tendência dos valores de circularidade na condição de início de vida da ferramenta.....	95
Figura 4.16 – Valores de circularidade na condição de fim de vida das ferramentas.....	96
Figura 4.17 – Valores de retitude de início e fim de vida da ferramenta.....	98
Figura 4.18 – Características do gume secundário da ferramenta D que o fazem atuar como elemento de guia	99

Figura 4.19 – Desgaste do gume secundário que leva à maior atuação do mesmo como elemento de guia.....	99
Figura 4.20 – Resultados de retitude em função da variação do avanço.....	100
Figura 4.21 – Variação dos valores de retitude em função do avanço	101
Figura 4.22 – Resultados de retitude em função da variação da velocidade de corte.....	102
Figura 4.23 – Resultados de retitude das ferramentas testadas na condição de início de vida	104
Figura 4.24 – Resultados de retitude das ferramentas testadas na condição de fim de vida	105
Figura 4.25 – Avaliação da cilindridade nas condições de início e fim de vida de ferramenta	106
Figura 4.26 – Curvas de tendência dos resultados de cilindridade	107
Figura 4.27 – Resultados de cilindridade em função da variação do avanço	108
Figura 4.28 – Resultados de cilindridade em função da variação do avanço	109
Figura 4.29 – Resultados de cilindridade variando-se a velocidade de corte	110
Figura 4.30 – Resultados de cilindridade das ferramentas nas condições de início e de fim de vida	111
Figura 4.31 – Variação do diâmetro da ferramenta A para diferentes avanços.....	113
Figura 4.32 – Variação do diâmetro da ferramenta B com diferentes avanços	114
Figura 4.33 – Variação do diâmetro das ferramentas C e D.....	115

SIMBOLOGIA

GNV		Gás Natural Veicular
CGI		<i>Compacted Graphite Iron</i>
GPS		<i>Geometrical Product Specifications</i>
ISO		<i>International Standardization Organization</i>
LSCI		<i>Least Squares Reference Circle</i>
ABNT		Associação Brasileira de Normas Técnicas
LMP		Laboratório de Mecânica de Precisão
α	[graus]	Ângulo de incidência
β	[graus]	Ângulo de cunha
γ	[graus]	Ângulo de saída
ε	[graus]	Ângulo de quina
χ	[graus]	Ângulo de direção
λ	[graus]	Ângulo de inclinação
r_e	[mm]	Raio de quina
a_p	[mm]	Profundidade de corte
b	[mm]	Largura de corte
h	[mm]	Espessura de corte
f	[mm]	Avanço
v_c	[m/min]	Velocidade de corte
v_f	[m/min]	Velocidade de avanço
R	[mm]	Raio do gume
F	[N]	Força de usinagem
F_c	[N]	Força de corte
F_f	[N]	Força de avanço
F_p	[N]	Força passiva
SV_γ	[mm]	Deslocamento do gume no sentido da face
SV_α	[mm]	Deslocamento do gume no sentido do flanco
VB	[mm]	Desgaste de flanco
VB_{max}	[mm]	Desgaste máximo de flanco

KL	[mm]	Largura do lábio da cratera
KT	[mm]	Profundidade da cratera
KM	[mm]	Afastamento médio da região mais profunda da cratera
MnS		Sulfeto de manganês
MgS		Sulfeto de magnésio
Fe ₃ C		Carbonato de ferro
CBN		Nitreto de Boro Cúbico
PCBN		Nitreto de Boro Cúbico Policristalino
IV		Início de vida da ferramenta
FV		Fim de vida da ferramenta

RESUMO

O bloco de motor é uma das principais peças que compõem o motor de um automóvel. O bloco é uma peça fundida que passa por uma série de processos de usinagem, até que se atendam as tolerâncias de forma e dimensional finais. No bloco a usinagem dos cilindros normalmente é realizada pelos processos de mandrilamento e de brunimento. O mandrilamento dos cilindros geralmente consta de três etapas: desbaste, semi-acabamento e acabamento. Atualmente o ferro fundido vermicular é um material alternativo ao ferro fundido cinzento na fabricação de blocos de motores. O primeiro possui propriedades mecânicas superiores ao último, o que possibilita a construção de motores com maior potência e menor massa. Contudo, o ferro fundido vermicular possui pior usinabilidade, reduzindo a vida da ferramenta em mais de 70% e a produtividade em até 50% no mandrilamento. Este trabalho objetiva estudar o mandrilamento de desbaste de cilindros de bloco em ferro fundido vermicular, através de ensaios realizados com quatro diferentes concepções de ferramentas de mandrilar. Essas diferenças são: a presença ou não de elementos de guias, o número de insertos e o escalonamento dos mesmos. Tal estudo foca o comportamento das ferramentas em relação à qualidade de forma (circularidade, retitude e cilindricidade), à qualidade dimensional, à produtividade e à vida. Nos ensaios foram selecionados parâmetros de corte para mesma produtividade (mesmo avanço) e parâmetros específicos para cada ferramenta. Estes serviram para avaliar o desempenho das ferramentas em relação à produtividade. Este estudo analisou a relação entre as características geométricas das ferramentas de mandrilar sobre as qualidades de forma e dimensional das peças, sobre a vida e a produtividade, e auxiliou no desenvolvimento de ferramentas capazes de reduzir em aproximadamente 50% os tempos de mandrilamento, tomando como referência o tempo praticado anterior aos ensaios.

Palavras-chave: Ferramentas de mandrilar, bloco de motor, ferro fundido vermicular, qualidade de forma e dimensional.

ABSTRACT

There are lots of pieces those assemble an automobile's engine, from among the cylinder block. The cylinder block is made of cast iron. After casting the cylinder of the cylinder block is machined with boring tools and honing tools, in order to get the required accuracy, regarding form quality and dimensional quality. Normally the cylinder boring operation is made in three steps: rough boring, pre-finishing and finishing. Nowadays Compacted Graphite Iron (CGI) is an alternative material to Gray Cast Iron (CI) for casting cylinder block. The first one has better mechanical properties than the second one, making possible smaller engines with higher power. However CGI is worst than CI regarding machinability, reducing, in some cases, 70% tooling life and 50% productivity in boring process. The aim of this job is to analyses four different roughing boring tooling concept, which have different number of inserts, staggering of the inserts, and guide elements. For each tool, results of roundness, straightness, cylindricity, productivity and tooling life are shown. Cutting data parameter were chosen to evaluate the performance of each tool to the same productivity (same feed) and to the maximum productivity. This study was important to relate form deviations, dimensional tolerances of cylinders, productivity and tooling life to the differences of each tooling concept. It was helpful to developing boring tooling concept those have reduced about 50% boring operation time, when it is compared to machining time used before.

Keywords: boring, cylinder block, compacted graphite iron, form quality and dimensional quality.

1 INTRODUÇÃO

A utilização do automóvel como meio de transporte data do início do século XX. Sua produção em maior escala iniciou-se em 1902, na Alemanha, e em 1903, nos EUA. Com a primeira guerra mundial, tanto a produção quanto a diversificação dos tipos de veículos (carros de passeio, caminhões, ônibus, tratores etc.) tiveram enorme aumento. No Brasil foi a partir da década de 60 que houve um incremento significativo nos meios de transportes rodoviários devido à expansão das indústrias automobilísticas, correspondendo hoje a 64% de toda a carga transportada no território brasileiro [1].

Atualmente existem mais de 800 milhões de automóveis no mundo. Em países desenvolvidos como os EUA há uma relação de aproximadamente 2 habitantes por automóvel, sendo que no Brasil essa relação chega a 8,4 habitantes por automóvel. Só no Brasil estima-se, segundo a ANFAEVA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores), que em 2005 a produção tenha alcançado a marca histórica de 2,3 milhões de unidades. Os maiores produtores de automóveis no mundo são os EUA e o Japão, produzindo em conjunto mais de 22 milhões de automóveis por ano [2].

Em relação aos empregos gerados, no Brasil atualmente são mais de 104 mil trabalhadores no setor automobilístico. Uma importante indústria automobilística brasileira produz anualmente aproximadamente 245 mil motores para carros de passeio, abastecendo o mercado interno e exportando para a América Latina e Europa [2].

No setor automobilístico os menores prazos para a introdução de novos produtos no mercado, reduzidos ciclos de vida e a alta multiplicidade de variantes dos produtos têm pressionado os fabricantes de automóveis na busca por novas soluções tecnológicas e organizacionais, a fim de se manterem competitivos.

Do universo de peças que compõem um automóvel, o motor é uma das mais importantes. As exigências de maior potência e estabilidade no

projeto de motores refletem-se diretamente sobre a qualidade da fabricação dos componentes. Estas exigências são essencialmente: maiores potências, motores de tamanho reduzido e maior rendimento (poucas perdas mecânicas e baixo peso) [3].

O bloco do motor é uma das partes mais volumosas e também mais importantes do motor. É uma peça fundida onde quase todos os componentes do motor estão acoplados. Em seu interior, o bloco abriga o virabrequim, bielas e pistões, entre outros componentes [Figura 1.1].



Figura 1.1 – Motor, bloco e componentes internos [4, 5]

O material classicamente utilizado em blocos de motores é o ferro fundido cinzento. Contudo a crescente busca das indústrias por novos mercados, pela redução dos custos e agregação de valor ao produto tem feito com que as mesmas procurem materiais alternativos para a fabricação de blocos de motores, como o alumínio e o ferro fundido vermicular. Este último tem-se apresentado como um material de uso em potencial na indústria automobilística, pois as melhores propriedades mecânicas deste material, em relação ao ferro fundido cinzento, permitem a fabricação de motores mais potentes, com menor relação peso/potência, gerando maior rendimento e economia de combustível, e diminuição da emissão de poluentes [6, 7, 8].

Durante a fabricação, após a fundição, o bloco passa por uma série de processos de usinagem. Normalmente o processo de usinagem dos cilindros do bloco consta de duas operações: mandrilamento e brunimento. A primeira é o processo de usinagem com ferramentas de geometria definida que, geralmente, consta de três etapas: desbaste, semi-acabamento e acabamento. A segunda é uma operação com ferramenta

de geometria não-definida, realizada normalmente em duas etapas: desbaste e acabamento (**Figura 1.2**).

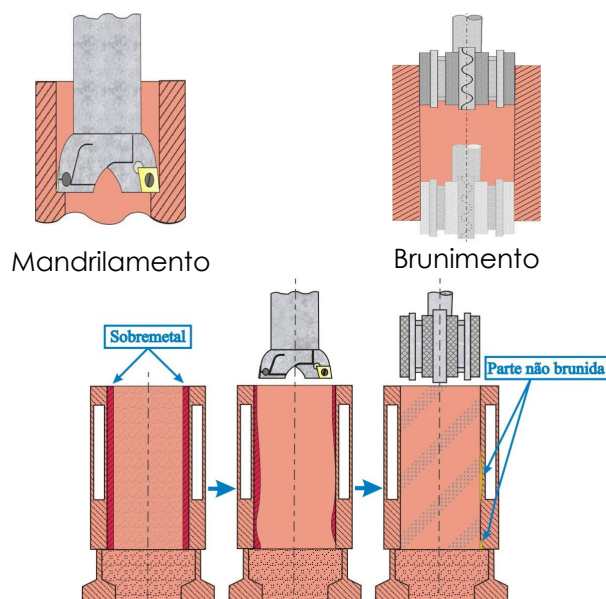


Figura 1.2 – Operações de usinagem dos cilindros

A confiabilidade da operação de mandrilamento está associada a vários fatores como, por exemplo, a fixação da peça, rigidez da máquina-ferramenta, parâmetros de corte, aplicação de fluido de corte, concepção da ferramenta de mandrilar, material da peça e a condição do pré-furo (o processo de mandrilamento necessita de um furo pré-existente). A qualidade geométrica e a dimensional do pré-furo a ser mandrilado (cilindricidade, retitude, circularidade, posicionamento etc.) são fundamentais para garantir a estabilidade das etapas seguintes do mandrilamento e do brunimento. A necessidade de redução dos custos de produção resulta na otimização destes fatores. Assim, surge a necessidade de conhecer e descrever os problemas de instabilidade que estão associados à qualidade geométrica e dimensional dos cilindros após cada etapa do mandrilamento.

As diferentes concepções das barras e cabeçotes de mandrilar refletem-se nos resultados obtidos em relação à vida das ferramentas, à qualidade geométrica e dimensional dos cilindros e, por consequência, no custo e na estabilidade do processo.

Diversas são as concepções de ferramentas de mandrilar existentes atualmente no mercado, porém os detalhes e as diferenças nas concepções das mesmas muitas vezes são escolhidos sem conhecimento acerca dos

resultados que serão obtidos em relação à qualidade geométrica e dimensional da peça usinada.

Visando o desenvolvimento do processo de mandrilamento dos cilindros do bloco do motor em ferro fundido vermicular, neste trabalho foram realizados testes com 4 diferentes concepções de ferramentas de mandrilar na operação de desbaste dos cilindros. As ferramentas diferem principalmente por possuir elementos de guias ou não, diferentes números de insertos e diâmetros escalonados. Espera-se que estas variações resultem na obtenção de diferentes valores de vida, potência consumida, qualidade de superfície, qualidade dimensional e geométrica da peça usinada.

Este trabalho tem como objetivo a descrição e análise das diferenças construtivas das ferramentas de mandrilar sobre a produtividade, a vida das ferramentas, os resultados de qualidade geométrica de retitude, circularidade e cilindridade, e da qualidade dimensional dos cilindros mandrilados. Espera-se com esta análise obter informações a respeito de qual configuração geométrica permite obter os menores desvios de forma, ou a maior vida da ferramenta ou a melhor produtividade. Tais informações poderão ser úteis no sentido de direcionar a escolha de uma ferramenta quando se deseja obter melhor qualidade da peça ou maior produtividade ou maior vida ou a combinação destes.

Este trabalho foi fruto de um projeto de parceria (Projeto Verde-amarelo) da UFSC com uma indústria de Santa Catarina. Na indústria muitas vezes não é possível a repetição de ensaios, e as condições de operação devem ser tais que não produzam um impacto negativo na produção.

O desenvolvimento das ferramentas de mandrilar foi baseado em uma análise comparativa realizada entre 4 diferentes fornecedores de ferramentas. Em reuniões onde estavam presentes os fornecedores, a empresa parceira e a equipe do projeto verde-amarelo da UFSC, algumas informações consideradas estratégicas pelos fornecedores e pela empresa não foram fornecidas ou não puderam ser divulgadas como, por exemplo, os materiais utilizados nos insertos (metal-duro e revestimento), os desenhos técnicos das ferramentas, entre outras. A ausência de algumas dessas

informações juntamente com as dificuldades encontradas para a execução dos ensaios, não permitiram que em alguns casos análises mais aprofundadas fossem realizadas neste trabalho.

Para o desenvolvimento deste trabalho foi inicialmente realizado um levantamento bibliográfico, para fundamentar teoricamente a análise de algumas das variáveis necessárias para a análise proposta (capítulo 2 - Estado da Arte). Assim, neste capítulo são explorados temas a respeito dos materiais utilizados para a fabricação dos blocos de motores, tipos de blocos, análise de tolerâncias geométricas e dimensionais que influenciam na qualidade dos cilindros, o processo de corte no mandrilamento, desgaste de ferramentas no mandrilamento, as diferenças construtivas das ferramentas de mandrilar e as influências destas diferenças nos resultados de qualidade geométrica e dimensional dos cilindros.

No capítulo 3 (Materiais de Métodos) é apresentada a metodologia empregada para a elaboração dos ensaios, são descritas as máquinas utilizadas na execução dos ensaios e nas medições, as características mecânicas e geométricas dos corpos de provas utilizados (blocos de motor), e são apresentadas as ferramentas empregadas para a execução dos testes evidenciando suas características geométricas e estruturais.

No capítulo 4 (Análise dos Resultados) são apresentadas as medições dos desvios dimensionais e geométricos dos cilindros usinados, os resultados de vida e potência de corte referentes a cada ferramenta ensaiada, e os insertos utilizados nas ferramentas. Através destas informações são mostradas as análises que relacionam as diferenças construtivas das ferramentas com os ganhos e os prejuízos em termos de qualidade geométrica e dimensional dos cilindros, produtividade e estabilidade da operação.

No capítulo 5 (Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros), conforme o título, são apresentadas as conclusões das influências das diferentes concepções sobre os desvios geométricos e dimensional dos cilindros, e as sugestões para continuidade e aperfeiçoamento do trabalho.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Bloco do Motor

Por se tratar de um importante componente dos motores de combustão interna, o bloco do motor deve atender a características bastante rígidas de fabricação, para atingir todas as exigências de qualidade geométrica, dimensional e de superfície.

O bloco é uma peça fundida (**Figura 2.1**) na qual existem galerias e canais, relacionados ao sistema de lubrificação e arrefecimento. Contém também os cilindros onde trabalham os pistões, e os alojamentos para os tuchos e árvore de comando. É no bloco que estão acoplados quase todos os componentes do motor, e seu interior abriga o virabrequim, bielas e pistões [4].

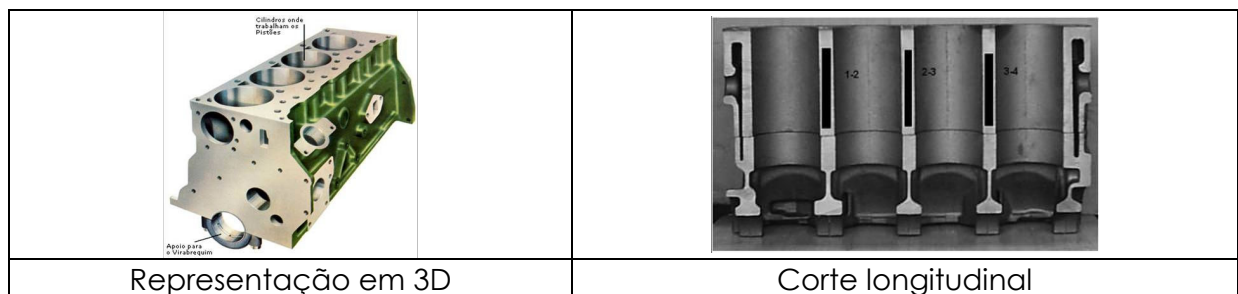


Figura 2.1 – Bloco do motor [4]

Os cilindros podem ser dispostos de diferentes maneiras nos blocos. Existem as seguintes concepções: motores em linha com os cilindros alinhados numa só fila em sentido longitudinal (**Figura 2.1**), os motores em “V” com cilindros em duas filas formando um ângulo entre si, os com cilindros opostos (**Figura 2.2**), e os em formato de estrela utilizados em alguns aviões.

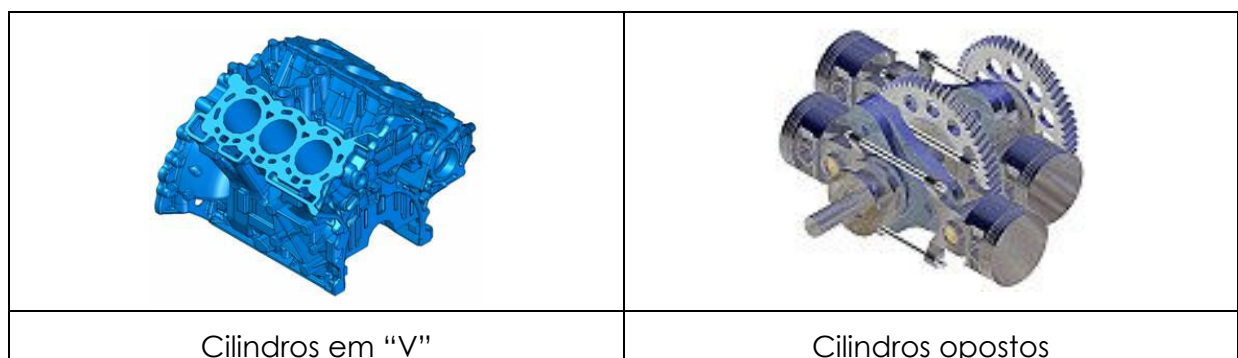


Figura 2.2 – Disposição dos cilindros no bloco [9,10]

2.2 Qualidade Geométrica e Dimensional e as Implicações na Seqüência de Usinagem dos Cilindros do Bloco

Assim como em qualquer peça fabricada pela indústria, ocorrem vários desvios geométricos nos cilindros do bloco do motor. Estes são inicialmente provenientes do processo de fundição, os quais devem, ao longo do processo de usinagem, serem reduzidos aos valores limites especificados em projeto (**Figura 2.3**).

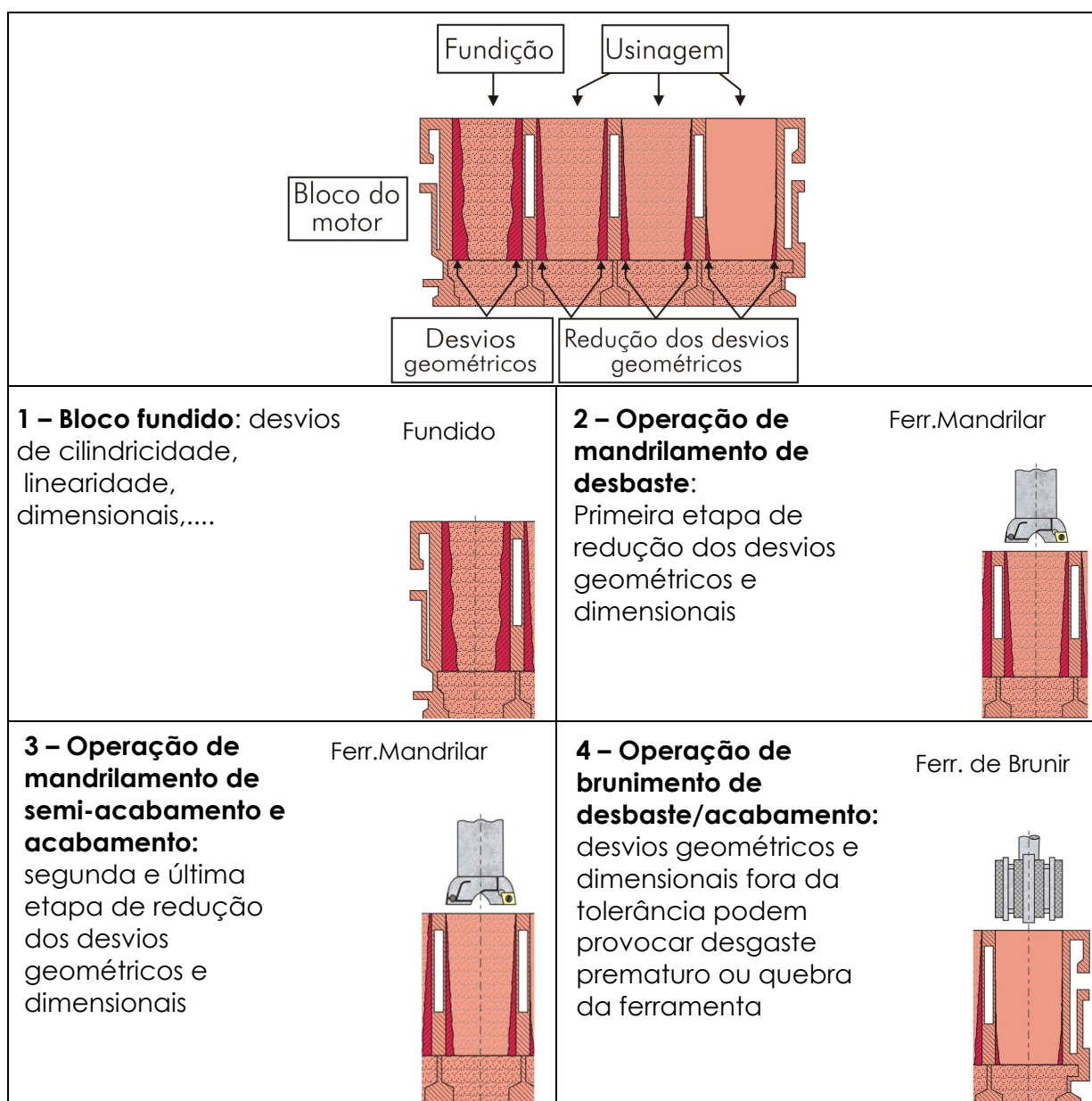


Figura 2.3 – Conseqüências dos desvios geométricos e dimensionais na usinagem dos cilindros

Nos cilindros de blocos de motores, a qualidade geométrica e dimensional dos cilindros usinados, e consequentemente a estabilidade e

produtividade dos processos envolvidos, resultam de um conjunto de fatores como: geometria e material das ferramentas de corte, material da peça de trabalho, fixação da peça, rigidez da máquina-ferramenta, condições de corte, entre outros.

Cada etapa da operação de mandrilamento deve fornecer como resultado peças com qualidade geométrica e dimensional conforme os limites de tolerância especificados. Se uma das etapas não produzir peças nas condições especificadas, pode ocorrer a redução da vida das ferramentas correspondentes às etapas de mandrilamento posteriores, e ao brunimento (sobrecarga devido ao excesso de material), com conseqüentes problemas de instabilidade da linha de produção e elevação do custo de fabricação.

O custo de produção devido a problemas com quebras e desgaste excessivos das ferramentas não se relaciona somente ao gasto de reposição das mesmas, mas também com a perda de produtividade.

2.3 Caracterização Geométrica e Dimensional de Cilindros de Motores

Para se analisar erros existentes em qualquer peça ou componente, antes de tudo é preciso medir. Medir é comparar [11]. O desenvolvimento tecnológico está diretamente ligado à medição. É através desta que se avalia o desempenho de um sistema, permitindo o seu aperfeiçoamento contínuo. A qualidade, a segurança, o controle de um elemento ou processo é sempre assegurada através de uma operação de medição. No caso da manufatura, a medição torna-se fundamental na garantia da qualidade do produto e na estabilidade do processo de fabricação, já que se trata de um sistema que produz peças e componentes que variam com referência aos valores que garantem o funcionamento ótimo do produto [12].

Na manufatura busca-se produzir peças e componentes dentro de certos limites de tolerâncias, calculados para que o produto possa desempenhar a sua função corretamente. Durante a etapa do projeto do

produto, esses limites precisam ser estudados, definidos e repassados aos desenhos, para serem efetivamente utilizados na fabricação e na inspeção das peças. Porém, os limites técnicos e econômicos também são fatores determinantes no cálculo das tolerâncias de determinada peça, pois normalmente, à medida que se estreitam as tolerâncias, mais caro torna-se o processo.

Antigamente, ao se projetar uma peça, somente as tolerâncias dimensionais eram especificadas no projeto. Assim, no projeto de um cilindro era especificado somente seu diâmetro, comprimento e a tolerância, de tal maneira que se pressupunha que a peça após a manufatura não divergia significativamente da forma perfeita visualizada pelo projetista. A evolução dos meios de fabricação e de medição mostrou que nas peças manufaturadas existe uma série de detalhes que, para o bom funcionamento e montagem com outros componentes, não podem ser especificados somente pela dimensão e tolerância [12]. Na **Figura 2.4** pode-se observar algumas formas de cilindros que não podem ser caracterizadas apenas pelo diâmetro e a tolerância.

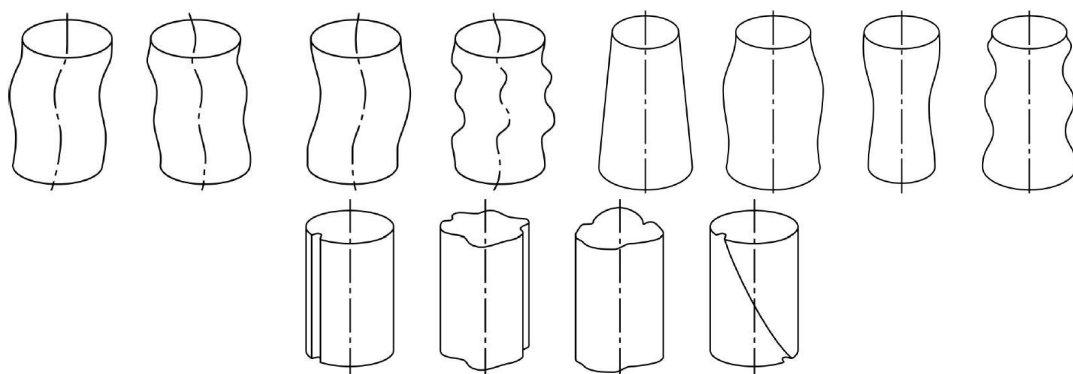


Figura 2.4 – Exemplos de desvios geométricos que os cilindros podem apresentar [13]

Quando uma peça está sendo projetada, o projetista a imagina como um objeto perfeito, ou seja, todas as dimensões são isentas de qualquer erro geométrico e as superfícies são perfeitas. Contudo, ao ser fabricada, a peça fica longe da perfeição. A forma é distorcida, as dimensões são diferentes da imaginada e a superfície é rugosa (**Figura 2.5**) [12, 13].

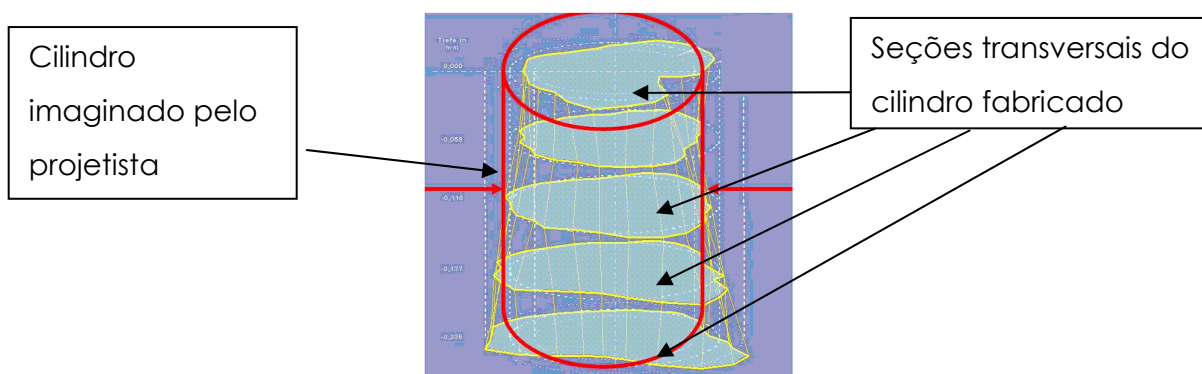


Figura 2.5 – Desvios geométricos em um cilindro [14]

Diante da necessidade de se especificar as peças de maneira completa, de modo que as permitam desempenhar as suas funções e serem montadas eficazmente, surge o enfoque das “especificações geométricas de produto” (GPS – *Geométricas Product Specifications*). Estas propõem a caracterização do produto através de tolerâncias para vários tipos de afastamentos, que tem como referência a geometria perfeita dos componentes [12, 13].

A caracterização do produto, segundo as especificações geométricas de produto, segue o seguinte esquema, como mostrado na **Figura 2.6**.

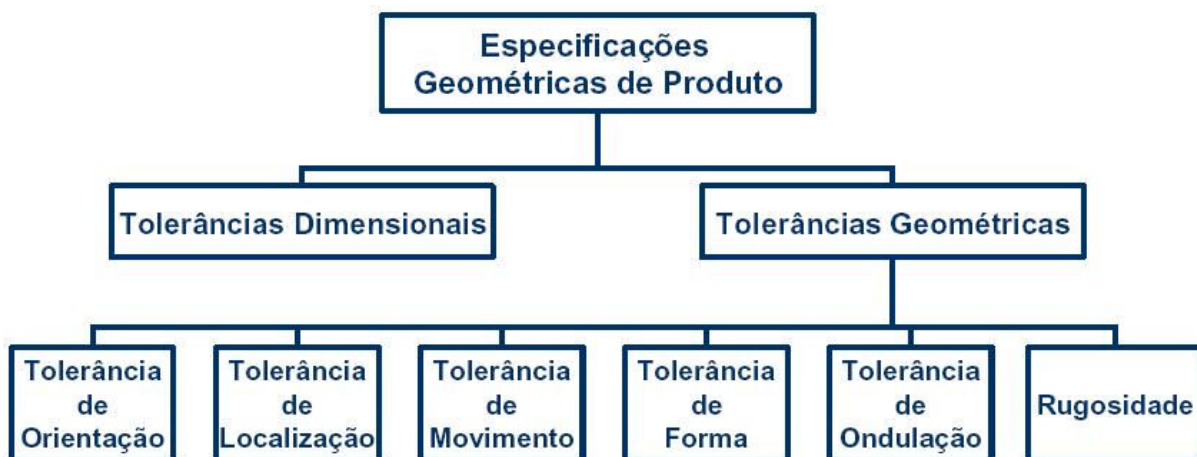


Figura 2.6 – Classificação das especificações geométricas de produto dentro das normas do sistema ISO-GPS (*Geometric Product Specification*) [13]

Nesta classificação existem dois grupos primários: tolerâncias dimensionais e geométricas. A primeira é utilizada para limitar desvios de tamanho, podendo ser definida como a faixa de aceitação da dimensão do componente em relação ao valor nominal definido em projeto. A segunda permite caracterizar desvios de orientação, de localização, de movimento, de forma, de ondulação e rugosidade do componente [12, 13].

No subconjunto “Tolerância de Forma” estão inseridos os conceitos de:

- Tolerância de retitude;
- Tolerância de planeza;
- Tolerância de circularidade;
- Tolerância de cilindridade;
- Tolerância de forma de uma linha qualquer;
- Tolerância de forma de uma superfície qualquer.

Desvios de forma podem ser definidos como o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem [15].

A tolerância de forma de uma peça limita as diferenças entre a superfície real da peça e a forma geométrica teórica. A forma de um elemento será correta quando o afastamento de cada um dos seus pontos for igual ou inferior ao valor da tolerância dada [16].

A utilização dessas tolerâncias no projeto de componentes e no controle de qualidade impede a fabricação de componentes que comprometerão o funcionamento dos mesmos e a estabilidade de operações posteriores de usinagem, que requerem peças com determinadas tolerâncias geométricas e dimensionais. Estas são essenciais para que não ocorra, por exemplo, quebra e desgaste excessivo de ferramentas.

2.3.1 Tolerâncias Dimensional e Geométricas na Qualidade dos Cilindros dos Blocos de Motor

Em relação aos cilindros dos blocos de motores a qualidade é observada mediante ao controle da tolerância dimensional e das tolerâncias geométricas de forma como retitude, circularidade, paralelismo e cilindridade. Neste contexto, segue abaixo a fundamentação a respeito destas variáveis.

a) Tolerância dimensional

Desvio dimensional é qualquer afastamento da característica “diâmetro” com referência ao valor alvo. O cilindro torna-se conforme ou

não-conforme dependendo a relação do diâmetro medido com a tolerância (**Figura 2.7**).



Figura 2.7 – Cilindros com diâmetros abaixo (a) e acima (b) da tolerância

O limite de tolerância superior pode ser definido como um valor “+” que é acrescentado ao valor nominal do diâmetro. O limite de tolerância inferior pode ser definido como um valor “-” abaixo do valor nominal do diâmetro. O valor da dimensão do cilindro que estiver contido na faixa “valor nominal +/- t” está dentro da tolerância dimensional especificada para este componente.

b) Retitude de uma linha

Segundo a norma ABNT NBR 6409 [17], retitude de uma linha é o campo de tolerância limitado por duas linhas paralelas afastadas de uma distância “t”, se a tolerância for especificada somente em um plano (**Figura 2.8**).

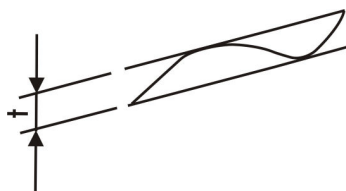


Figura 2.8 – Especificação de tolerância de retitude [17]

Cada linha pertencente à superfície deve estar contida entre duas linhas retas paralelas, afastadas de 0,1 mm (**Figura 2.9 a**). Na **Figura 2.9 b**, por exemplo, em cada comprimento livremente escolhido de 200 mm, cada geratriz deve estar contida dentro de duas linhas retas paralelas, afastadas em 0,1 mm [17].

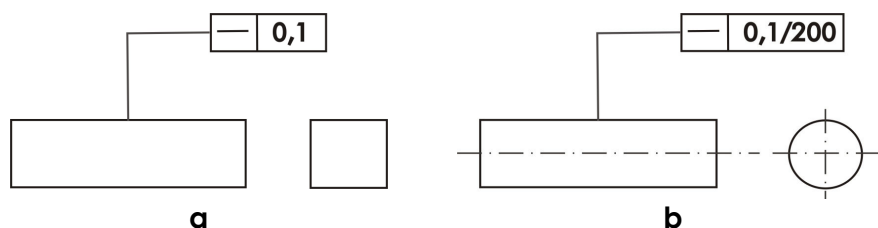


Figura 2.9 – Exemplos de aplicação da tolerância de retitude [17]

Existe o caso de o campo de tolerância ser limitado por um cilindro com diâmetro “t”, se o valor da tolerância for precedido pelo símbolo ϕ (**Figura 2.10**).

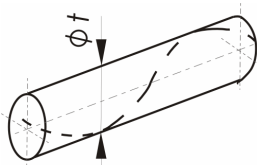


Figura 2.10 – Representação do erro de retitude [17]

Esse é o caso utilizado para definir as exigências de retitude do eixo derivado de uma característica cilíndrica, tal como mostrado no exemplo da **Figura 2.10** [17].

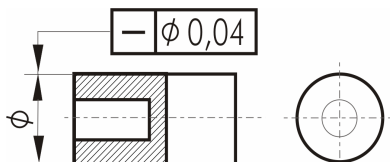


Figura 2.11 – Indicação da tolerância de retitude [17]

c) Tolerância de circularidade

Segundo a norma ABNT NBR 6409 [17], tolerância de circularidade é a limitação na seção de medição por dois círculos concêntricos, afastados de uma distância “t” (**Figura 2.12**).

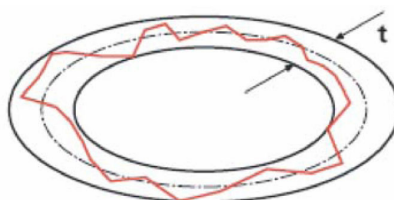


Figura 2.12 – Desvio de circularidade em um cilindro [12]

Como exemplo de aplicação, em um plano que corta transversalmente uma peça que tem como seção transversal uma circunferência, esta deve estar contida entre dois círculos concêntricos definidos nesse plano. Na **Figura 2.13**, a tolerância definida pela distância por dois círculos concêntricos não deve ultrapassar 0,08 mm.

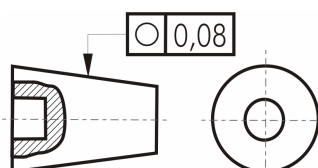


Figura 2.13 – Representação do desvio de circularidade [17]

d) Tolerância de paralelismo

A norma ABNT NBR 6409 [17] especifica que a tolerância de paralelismo de uma linha em relação a uma linha de referência é limitada por duas linhas retas paralelas, afastadas de uma distância “t” e paralelas à linha de referência, se a tolerância for especificada em um só plano (**Figura 2.14**).

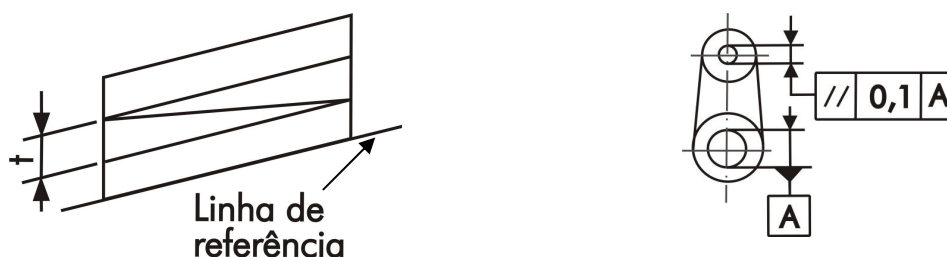


Figura 2.14 – Especificação de tolerância de paralelismo e aplicação [17]

A medição de paralelismo nos cilindros do bloco normalmente é realizada através das geratrizes, tomando como referência uma delas.

e) Cilindricidade

Segundo a norma ABNT 6409 [17] a cilindridade é especificada pela tolerância da geratriz que gera a superfície do cilindro. A superfície real deve-se situar entre dois cilindros coaxiais, os quais têm uma distância “t” (**Figura 2.15**).

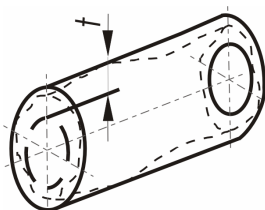


Figura 2.15 – Ilustração do erro de cilindridade [17]

A **Figura 2.16** ilustra que a tolerância de cilindridade definida é de $t = 0,2$ mm.

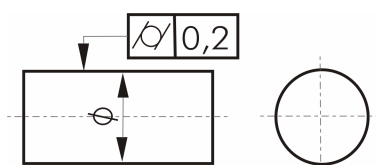


Figura 2.16 – Representação da tolerância de cilindridade [17]

2.4 O Processo de Corte no Mandrilamento

2.4.1 Geometria da Ferramenta

A geometria da ferramenta de corte influencia diretamente os processos de formação de cavacos, saída dos cavacos, forças de corte, desgaste da ferramenta e, sobretudo, no resultado do trabalho. Para cada geometria existe uma adequada correspondência em termos de material da ferramenta, material da peça, condições de corte, condições específicas da máquina-ferramenta e geometria da peça (**Figura 2.17**) [18].

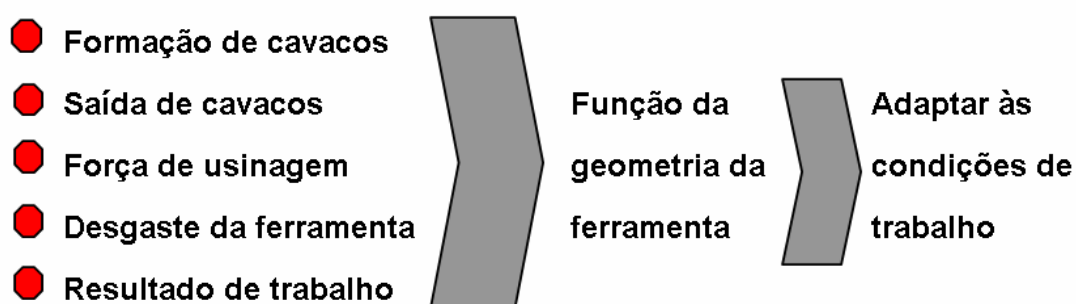


Figura 2.17 – Influência da geometria da ferramenta sobre o processo de usinagem [18]

Uma operação de usinagem pode perseguir diferentes objetivos, como a produtividade, a qualidade da peça, o custo, entre outros. A geometria da ferramenta é uma variável que influencia fortemente esses objetivos.

No mandrilamento a cinemática do processo pode ser comparada à cinemática do processo de torneamento (**Figura 2.18**). Apesar de no mandrilamento a ferramenta possuir movimento de rotação ao invés da peça, como ocorre no torneamento, pode-se dizer que a maneira como ocorre o corte de material nestes dois processos é semelhante. Deste modo, para facilitar a identificação e posicionamento dos ângulos na ferramenta de mandrilar, faz-se o uso de uma figura de uma ferramenta de torneiar.

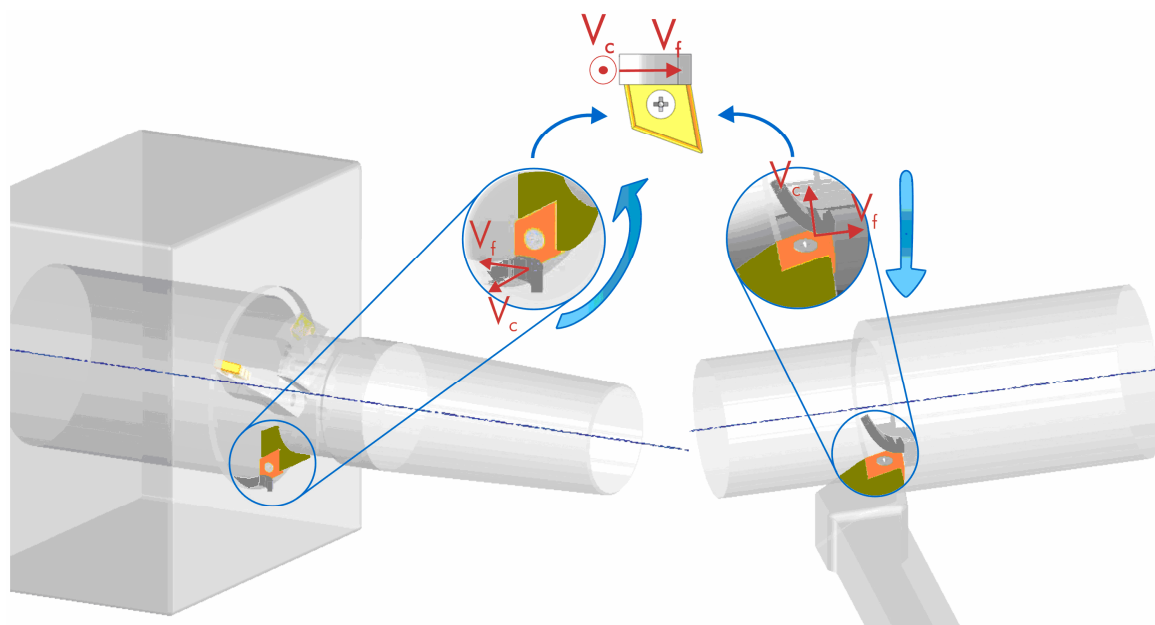


Figura 2.18 – Analogia do processo de mandrilamento com o torneamento

2.4.2 Força de Usinagem

Assim como no processo de torneamento, no mandrilamento a força de usinagem (**Figura 2.19**) pode ser decomposta nas seguintes componentes: força de corte F_c , força de avanço F_f e força passiva F_p .

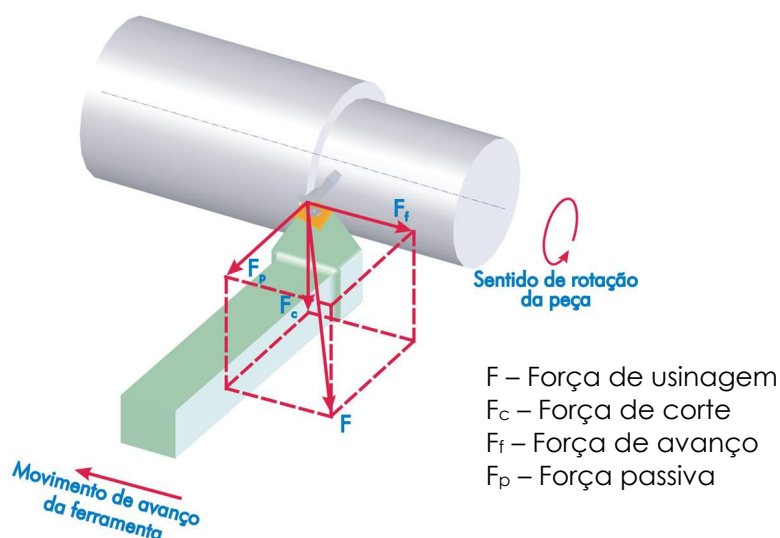


Figura 2.19 – Força de usinagem e suas componentes [18]

A geometria da ferramenta e as condições de corte influenciam diretamente na força de usinagem, tanto na direção quanto no módulo desta. Nos gráficos da **Figura 2.20** são apresentados qualitativamente a dependência das componentes da força de usinagem F_c , F_f e F_p em função do avanço f , da velocidade de corte v_c , da profundidade de corte a_p e do ângulo de direção do gume χ_r no sistema de coordenadas lineares [18].

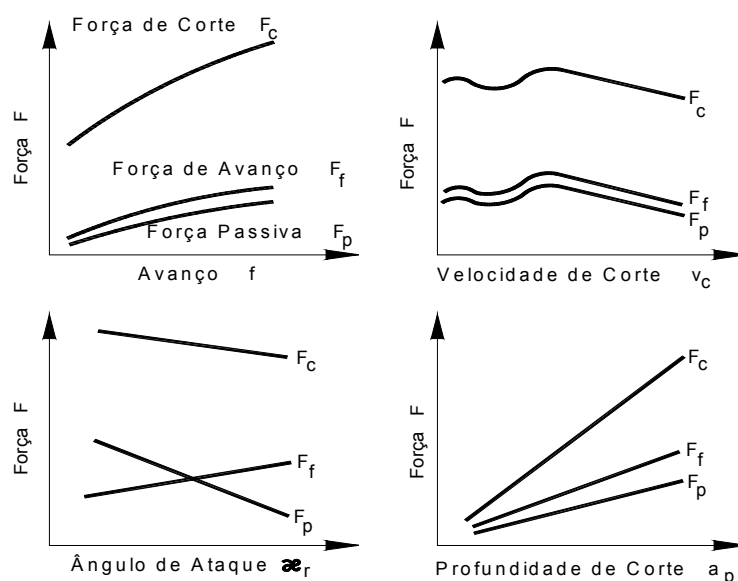


Figura 2.20 – Componentes da força de usinagem em função do avanço, velocidade de corte [18]

Quantitativamente as componentes da força de usinagem aumentam à medida que se aumentam os parâmetros de profundidade de corte a_p e avanço f .

Em relação à velocidade de corte, à medida que se aumenta o valor desta, ocorre o aumento da geração de calor na região de corte e, portanto, há elevação da temperatura nesta região. O aumento da temperatura do material da peça reduz a resistência mecânica do mesmo, proporcionando a diminuição das componentes da força de usinagem [18, 19, 20].

O aumento do ângulo de direção do gume (χ_r) proporciona o aumento da espessura de cavaco h e a diminuição da largura do cavaco b . Como a força de corte F_c é proporcional à profundidade de corte a_p (equivalente à largura do cavaco b), ela aumenta de forma inversamente proporcional ao avanço (equivalente à espessura do cavaco h), resultando das duas variações uma leve redução de F_c com aumento de χ_r [18].

A força de usinagem também é influenciada pelo ângulo de saída e de inclinação. Quanto maiores estes ângulos, menores serão as componentes da força de usinagem. O aumento do ângulo de saída diminui a deformação sofrida pelo cavaco ao atingir a face da ferramenta (**Figura 2.21**).


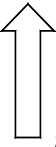
Fatores de influência		Mudança nos componentes das forças de usinagem para cada grau de ângulo mudado		
		Força de corte F_c	Força de avanço F_f	Força passiva F_p
Diminuição 	Ângulo de saída	↑ 1,5%	↑ 5,0%	↑ 4,0%
	Ângulo de inclinação	↑ 1,5%	↑ 1,5%	↑ 10,0%
Aumento 	Ângulo de saída	↓ 1,5%	↓ 5,0%	↓ 4,0%
	Ângulo de inclinação	↓ 1,5%	↓ 1,5%	↓ 10,0%

Figura 2.21 – Influência do ângulo de saída e do ângulo de inclinação nas componentes das forças de usinagem [18]

2.4.3 Potência de Usinagem

O conceito de potência pode ser definido como sendo o produto entre a força e a velocidade que um determinado sistema desenvolve. Aplicando o conceito à usinagem, a potência de usinagem é o resultado das somas do produto das componentes da força de usinagem com suas respectivas velocidades.

O valor da potência de usinagem pode ser aproximado pelo valor da potência de corte, pois a contribuição da componente da potência de avanço é uma parcela pequena (de 0,03 a 3%) devido à velocidade de avanço ser muito baixa, e a força passiva não contribui na potência de usinagem, pois se não existe velocidade nesta direção, não existe potência [18].

2.5 Desgaste de Ferramentas no Mandrilamento

2.5.1 Causas e Mecanismos de Desgaste

Durante o mandrilamento o gume da ferramenta é submetido a diversos mecanismos de desgaste. A ação simultânea desses mecanismos

faz com que as causas e os efeitos dificilmente possam ser distinguidos entre si. Os principais mecanismos de desgaste são:

- Abrasão mecânica;
- Adesão;
- Difusão;
- Oxidação;
- Solicitações térmicas e mecânicas.

A **Figura 2.22** ilustra a ocorrência dos mecanismos de desgaste em função da temperatura de corte, sendo esta influenciada pela velocidade de corte e pelo avanço, entre outros parâmetros.

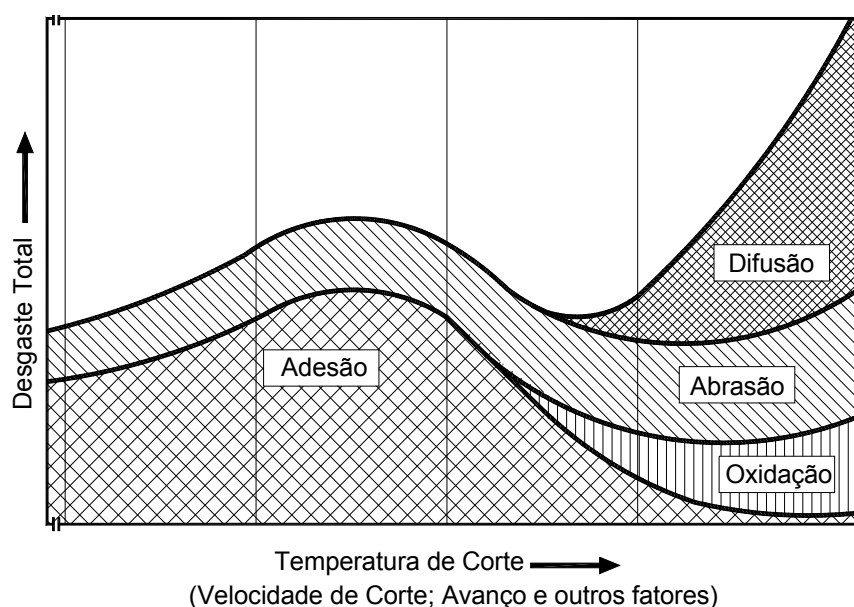


Figura 2.22 – Causas de desgaste na usinagem [18]

A abrasão mecânica ocorre em função do atrito dinâmico entre a peça e a ferramenta. Isto provoca o arranque de partículas do material da ferramenta devido à presença de partículas duras no material da peça. A temperatura também contribui para o desgaste por abrasão, já que o aumento da temperatura diminui a dureza do material da ferramenta [18].

A adesão é a ocorrência de micro-caldeamentos na ferramenta ocorridos sob determinadas condições de pressão e temperatura, provenientes do processo de corte, juntamente com a afinidade química entre os materiais da ferramenta e da peça. Quando o material da peça aderido na superfície da ferramenta se desprende, leva consigo uma parte do material da ferramenta, provocando a deterioração da mesma [18].

A difusão é o mecanismo de desgaste que ocorre em função da temperatura na zona de corte. A partir de elevadas temperaturas, inicia-se a transferência de átomos e moléculas pertencentes à rede cristalina de um material para a rede cristalina de outro, constituídos de elementos que apresentam afinidades entre si [18].

A oxidação, assim como a difusão, ocorre a altas temperaturas e com a presença de oxigênio na região aquecida. É uma reação química na qual o oxigênio se combina com o material da ferramenta alterando as propriedades mecânicas deste [18].

As solicitações térmicas e mecânicas são as responsáveis pela fadiga térmica e mecânica do material, proporcionando deformações plásticas, lascamentos, fissuras transversais e longitudinais na ferramenta de corte [18].

A compreensão dos mecanismos de desgaste que ocorrem no processo de mandrilamento, em função do material da peça e dos parâmetros de corte utilizados, é fundamental no sentido de selecionar o tipo de material de ferramenta mais adequado para as condições de corte empregadas.

2.5.2 Formas de Desgaste

Os mecanismos de desgaste atuantes na ferramenta durante a usinagem ocasionam a deterioração da ferramenta. A deterioração, conhecida como “desgaste”, é ocasionada pela remoção de porções de material em determinadas regiões da ferramenta (**Figura 2.23**).

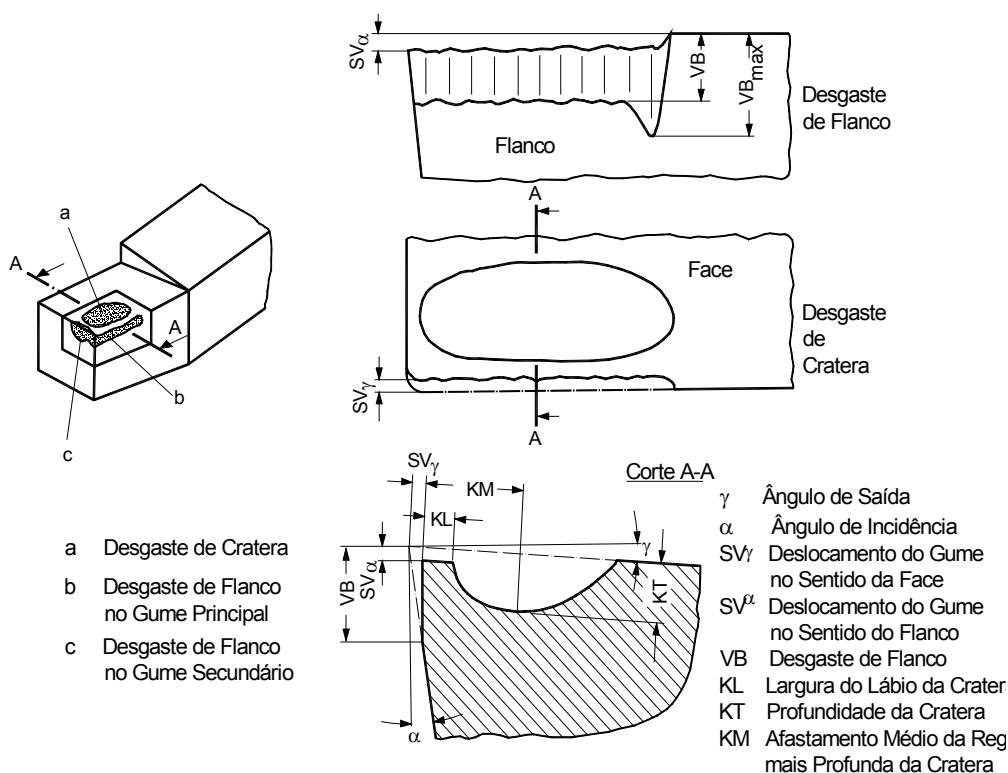


Figura 2.23 – Formas de desgaste e grandezas a serem medidas na cunha [18]

Dentre as grandezas de desgastes mais utilizadas, estão o desgaste médio de flanco VB e o desgaste máximo de flanco VBmax. Estes caracterizam as marcas de desgaste médio e máximo encontradas no flanco da ferramenta.

2.6 Materiais para a Fabricação de Bloco de Motor

Dentre as ligas ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria automobilística. Os blocos de motores são na sua maioria fabricados de ferro fundido cinzento, ferro fundido vermicular e em ligas de alumínio. A utilização de ferros fundidos na fabricação de peças deve-se em grande parte ao baixo custo de fabricação para formas complexas (devido ao processo de fundição), associado normalmente a uma boa usinabilidade [21].

Os ferros fundidos são ligas de ferro-carbono contendo no mínimo 2,11% de carbono, silício (entre 1 e 3%) e enxofre (abaixo de 0,02%). Eles podem ou não conter outros elementos de liga.

O ferro fundido cinzento é o material mais aplicado na fabricação de blocos de motores a gasolina, a álcool e a gás. A resistência oferecida por este material é suficiente para atender às taxas de compressão requeridas por esses motores atualmente.

Já o ferro fundido vermicular, por possuir resistência mais elevada que o cinzento, por sete a oito anos foi mais utilizado para confeccionar protótipos e motores de carros de corrida. Atualmente é aplicado predominantemente na fabricação de motores a diesel [22].

Além do ferro fundido, utilizam-se também ligas de alumínio como material de fabricação de blocos para motores a gasolina, a álcool e a GVN (gás natural veicular). Estas ligas diminuem o peso e aumentam a condutibilidade térmica. São, contudo, de preço mais elevado quando comparados aos ferros fundidos.

2.6.1 Ferro Fundido Cinzento

A denominação “cinzento” refere-se à coloração escura observada na fratura do material. Os elementos de liga fundamentais são o carbono e o silício, apresentando também uma estrutura em que uma parcela relativamente grande do carbono está no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado (Fe_3C) [21]. O teor de silício varia entre 1,0 e 3,0 % e a grafita se apresenta na forma de flocos, normalmente circundados por uma matriz de ferrita ou perlita. Devido às extremidades afiadas e pontiagudas dos flocos da grafita, que agem como concentradores de tensão, o ferro fundido cinzento é frágil quando submetido à tração (**Figura 2.24**) [23].

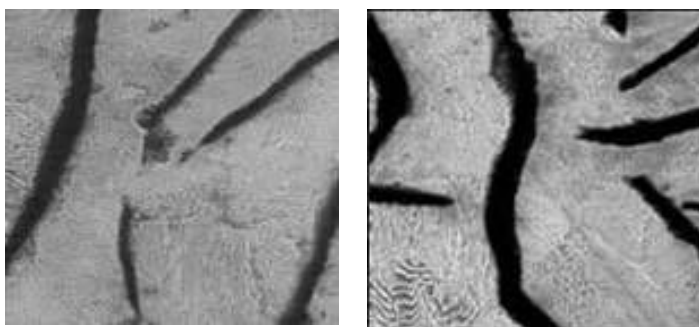


Figura 2.24 – Microestrutura do ferro fundido cinzento (1000x) [23]

Sua resistência e ductilidade são maiores sob compressão, além de terem excelentes capacidades de amortecimento de vibrações e elevada resistência ao desgaste mecânico.

O ferro fundido cinzento apresenta uma larga utilização para componentes mecânicos, como componente estrutural de máquinas e equipamentos pesados sujeitos à vibração, peças fundidas de vários tipos que não necessitam de elevada resistência mecânica, blocos de motores, pistões, cilindros, discos de embreagem e peças fundidas de motores a diesel [3, 6, 21]. A larga utilização deve-se às características como:

- Fácil fusão e moldagem;
- Boa resistência mecânica;
- Excelente usinabilidade;
- Boa resistência ao desgaste;
- Boa capacidade de amortecimento;
- Resistência a choques térmicos;
- Bom acabamento da superfície usinada.

As porcentagens relativas de ferrita e perlita influem na usinabilidade do material, que se torna pior à medida que se aumenta o teor de perlita. A presença de grafita reduz o atrito entre a ferramenta e a peça e diminui a estrutura básica metálica. Isso proporciona melhora na usinabilidade comparando-se aos aços e ferros fundidos sem grafita. A grafita resulta em cavacos quebradiços, menores forças de corte e aumento da vida da ferramenta [18].

2.6.2 Ferro Fundido Vermicular

O ferro fundido vermicular (CGI - *Compacted Graphite Iron*) tem apresentado uma crescente aceitação na indústria automobilística, demonstrando possibilidades de utilização em diversos componentes que normalmente são fabricados em ferro fundido cinzento, tais como discos de freio, coletores de escapamento, cabeçotes de motor e, principalmente, blocos de motores diesel [24].

O ferro fundido vermicular permite a fabricação de motores a diesel com uma combustão mais eficiente, pois admite maiores pressões na câmara de combustão, devido às suas melhores propriedades quando comparado ao ferro fundido cinzento. Atualmente, a fabricação de blocos em ferro fundido vermicular a preços competitivos ainda apresenta dificuldades devido à sua menor usinabilidade em comparação ao ferro fundido cinzento [25].

O ferro fundido vermicular apresenta a grafita em forma de flocos interconectados, os quais conferem a este material propriedades intermediárias entre o ferro fundido cinzento e o nodular [26].

A composição do ferro fundido vermicular é muito similar à do ferro fundido cinzento. A grande diferença está na presença de magnésio (Mg), que é o elemento responsável pela vermicularização da grafita. No ferro fundido vermicular o magnésio tem de ser mantido em uma faixa bastante estreita, entre 0,010% e 0,012%. Acima desse teor de magnésio, o ferro deixa de ser vermicular e perde suas características. No ferro fundido cinzento não há magnésio, ou há quantidade muito pequena [26].

A presença de magnésio na quantidade tolerável (0,010 – 0,012%) faz com que se formem, no ferro fundido, estrias grossas ou 'vermes' de grafita, daí o nome vermicular (**Figura 2.25**). É esta estrutura que determina a resistência do material.

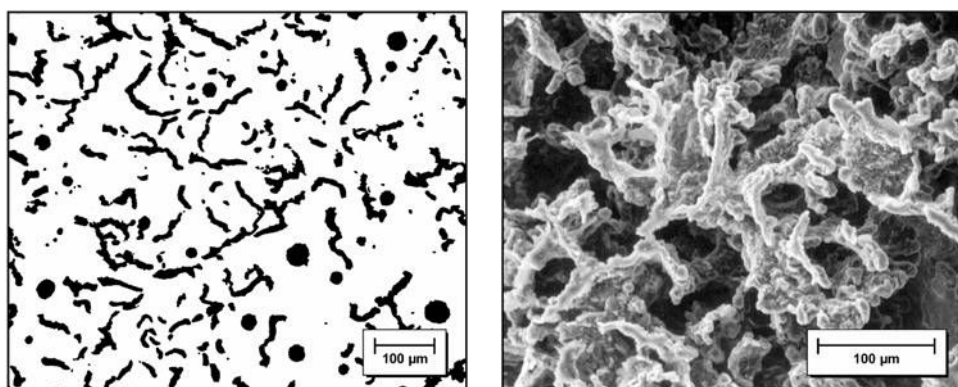


Figura 2.25 – Foto da microestrutura do Fofu vermicular [24]

Comparado aos tradicionais ferros fundidos com grafita lamelar, o ferro fundido vermicular pode apresentar incrementos de 75% no limite de resistência, 35% a 40% no módulo de elasticidade e o dobro de resistência à

fadiga. A morfologia compacta, com extremidades arredondadas, torna a nucleação e propagação de trincas muito mais difícil quando a forma de grafita do ferro fundido vermicular é comparada com a forma da grafita do ferro fundido cinzento (grafita lamelar) [26].

2.7 Usinabilidade de Ferros Fundidos

O termo usinabilidade compreende todas as propriedades de um material que influenciam sobre o processo de usinagem. Através deste termo são descritas todas as dificuldades apresentadas pelo material durante a sua usinagem [18].

A usinabilidade de um material é observada no contexto do processo de fabricação, do material da ferramenta e das condições de corte. Para avaliar a usinabilidade geralmente são usados quatro critérios:

- Vida da ferramenta;
- Força de usinagem;
- Qualidade da superfície usinada;
- Forma dos cavacos.

A usinabilidade dos ferros fundidos, assim como de outros materiais metálicos, está vinculada à presença e à quantidade de elementos de ligas e da forma da estrutura metálica. Além desses fatores, existe nos ferros fundidos uma influência muito grande da forma e da quantidade da grafita (carbono precipitado, devido à sua insolubilidade com teores acima de 2,11%), sobre a usinabilidade.

A grafita induz a formação de trincas antes mesmo da deformação plástica do restante da estrutura do ferro fundido, levando a cavacos quebradiços e arrancados, principalmente com baixa velocidade de corte.

A presença da grafita nesses materiais reduz o atrito entre a ferramenta e a peça, quando comparados com outros materiais que não a possuem em sua estrutura. Estes fatores geram menores forças de usinagem e, portanto, menor consumo de energia e aumento da vida da ferramenta de corte [18].

2.7.1 Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular

Com uma resistência à tração de no mínimo 75% maior e dureza de aproximadamente 45% maior quando comparado ao ferro fundido cinzento, o ferro fundido vermicular apresenta maiores dificuldades na usinagem em relação ao ferro fundido cinzento [24].

O aumento da resistência à tração e a maior dureza do ferro fundido vermicular resulta em aumento das forças de usinagem. Por este fato, na usinagem deste material, verifica-se um aumento de 20-30% na potência de corte, com a necessidade de uma fixação mais reforçada da peça quando comparado à usinagem do ferro fundido cinzento [24]. Além de maior resistência à tração, observa-se que o ferro fundido vermicular é 33% mais abrasivo que o ferro fundido cinzento [27]. A maior ductibilidade do primeiro resulta em maior zona de contato entre o cavaco e a face da ferramenta.

Existem diversas variáveis metalúrgicas que influenciam a usinabilidade do ferro fundido vermicular. Dentre elas, podem-se citar: a quantidade de perlita, a influência das inclusões, a forma da grafita e os efeitos dos elementos de liga. A forma da grafita e os efeitos dos elementos de liga são citadas como sendo as principais variáveis na usinabilidade do ferro fundido vermicular [27, 28, 29, 30].

a) Influência da forma da grafita

Nos ferros fundidos o formato da grafita na matriz metálica exerce uma influência considerável nas propriedades mecânicas do material e na usinabilidade do mesmo.

O formato lamelar da grafita no ferro fundido cinzento, por exemplo, possui extremidades pontiagudas. Estas agem como grandes concentradores de tensão, ocasionando a redução da resistência mecânica do material, principalmente quando o mesmo é submetido a esforços de tração.

Já no ferro fundido vermicular a geometria da grafita apresenta a característica de extremidades arredondadas e interligadas com as grafitas

vizinhas. Isto proporciona um ganho de resistência e tenacidade, piorando, entretanto, a usinabilidade do material [26, 27, 28].

b) Efeitos dos elementos de liga

A adição de elementos de ligas também exerce forte influência na usinabilidade dos ferros fundidos. No ferro fundido vermicular os elementos normalmente utilizados para alterar as propriedades mecânicas do material e a usinabilidade são: o enxofre, o silício, o titânio, o cromo e o manganês [6].

No ferro fundido cinzento o enxofre (teor entre 0,08 a 0,12%) reage com o manganês (Mn) formando inclusões de sulfeto de manganês (MnS). Durante a usinagem, estas inclusões de sulfeto de manganês formam uma camada protetora no gume da ferramenta, funcionando como uma barreira contra os mecanismos de desgastes de abrasão e difusão [25, 26, 27].

Para obter o ferro fundido vermicular é necessária a adição de magnésio (Mg) na sua composição. Este elemento atua como agente nodularizante da grafita formando as grafitas compactas com formato vermicular. No ferro fundido vermicular o baixo teor de enxofre (0,005 a 0,025%) e a presença de magnésio, o qual tem maior afinidade química com o enxofre, impede a formação do MnS, dando lugar ao MgS. Com a ausência do MnS não é formada a camada protetora que reduz os mecanismos de desgaste de abrasão e de difusão na ferramenta, resultando em menor vida da ferramenta quando comparada à usinagem do ferro fundido cinzento [27, 31].

2.8 Vida das Ferramentas de Corte

Uma das mais importantes relações no processo de usinagem é a vida da ferramenta com os parâmetros de corte [32]. Denomina-se vida de uma ferramenta o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzindo os tempos passivos), até perder a capacidade de corte [19, 33].

De acordo com König [18] e Stemmer [20], a vida de uma ferramenta pode ser definida como sendo o tempo em que a mesma trabalha efetivamente, sem perder o corte ou até que se atinja um critério de fim de vida previamente estabelecido. Dentre os vários fatores que determinam o fim de vida de uma ferramenta pode-se citar:

- Lascamento do gume;
- Quebra da ferramenta (pastilha);
- Desgaste excessivo no flanco ou na face da ferramenta;
- Temperaturas excessivas atingidas na interface cavaco/ferramenta;
- Tolerâncias dimensionais da peça não são mais possíveis de serem obtidas;
- Acabamento da peça não é mais satisfatório;
- Aumento excessivo das forças de usinagem [18, 20].

Através do controle destes fatores numa operação de usinagem, pode-se saber quando a ferramenta deve ser substituída ou reafiada. A quantificação da vida da ferramenta pode então ser determinada através de vários critérios, como: tempo total de trabalho, percurso de corte, volume de material removido, número de peças produzidas, nível da marca de desgaste, tolerância dimensional da peça, ou da melhor maneira de se adaptar ao tipo de operação [18].

Esses critérios usualmente variam com o tipo de operação (desbaste, semi-acabamento, acabamento). Contudo, quando o fim de vida é atingido, as ferramentas são trocadas ou reafiadas, antes que algum dano ou quebra catastrófica do gume ocorra e comprometa a qualidade final da peça ou a integridade da máquina-ferramenta. Assim o controle do desgaste da ferramenta é fundamental para maximizar o tempo de uso da ferramenta, aumentando sua produtividade [18, 34].

2.9 Materiais de Ferramentas de Corte na Usinagem do Ferro Fundido Cinzento e Vermicular

Na usinagem de ferro fundido cinzento pode-se utilizar uma grande variedade de materiais de corte. Os três tipos de materiais mais utilizados são: o metal-duro, a cerâmica e o CBN. Os metais-duros clássicos para a usinagem de ferro fundido cinzento com grafita lamelar são do grupo K. Para a usinagem fina ou superfina são apropriadas ferramentas cerâmicas [18].

Os materiais de ferramentas utilizados na usinagem do ferro fundido vermicular ainda estão em fase de pesquisa. Num estudo realizado por Xavier [29], verificou-se qual é o melhor material de ferramenta, dentre o CBN, cerâmica e metal-duro na usinagem do ferro fundido vermicular com corte contínuo. Segundo Xavier [29], pode-se concluir que o material que se mostrou mais adequado tecnicamente foi o metal-duro. Nas ferramentas cerâmicas, constatou-se como desgaste predominante a abrasão. Apesar de a cerâmica possuir dureza maior que o metal-duro, seus tempos de vida, quando comparados com os dos metais-duros utilizados na pesquisa, foram inferiores, o mesmo acontecendo com as ferramentas de CBN.

Dawson e Schroeder [24], em estudos de usinabilidade do ferro fundido vermicular, também concluíram que em processos com corte não-interrompido como o torneamento e o mandrilamento o metal-duro obteve os melhores resultados. Já em ensaios de fresamento (corte interrompido) o PCBN obteve os melhores resultados, ficando o metal-duro em segundo lugar.

2.10 Processos de Usinagem de Cilindros com Ferramentas de Corte com Geometria Definida

2.10.1 Definição de Diferentes Processos

Para a usinagem de cilindros do bloco com ferramentas de corte com geometria definida podem ser utilizados diferentes processos como, por exemplo, o alargamento, o torneamento interno, o mandrilamento e a

furação. Devido à grande evolução das ferramentas de corte e ao aumento dos limites que diferenciam os processos de usinagem, torna-se difícil, em alguns casos, a classificação desses processos. No processo de desbaste, semi-acabamento e acabamento de pré-furos, quando a peça permanece parada e a ferramenta possui movimento de rotação, podem ser empregados os processos de alargamento e mandrilamento. Atualmente existem várias concepções de ferramentas de mandrilar as quais possuem características construtivas encontradas também nos alargadores e nas brocas (elementos de guias principalmente). Em função de existirem elementos construtivos comuns entre as ferramentas, que antigamente caracterizavam bem um alargador ou uma barra de mandrilar ou uma broca, existem muitas situações difíceis de qualificar a ferramenta em um ou outro tipo. As definições dos processos dadas por muitos pesquisadores também não são capazes de caracterizar eficazmente as diferenças entre eles. Assim, seguem algumas definições.

O alargamento é um processo de usinagem de precisão com retirada de cavacos, com ferramentas de geometria definida, que tem por objetivo proporcionar um aumento de diâmetro, melhoria de qualidade da superfície usinada e melhoria na geometria de furos já existentes. Durante a operação de alargamento, há uma rotação da ferramenta e/ou da peça, e um avanço relativo entre a peça e ferramenta, o que produz uma pequena remoção de material das paredes do furo [35].

A operação de furação pode ser definida como um processo com movimento relativo rotativo principal, onde o processo de corte apresenta um movimento de corte circular. É uma operação utilizada para a obtenção de um furo em um componente sólido, onde a ferramenta possui movimento de avanço apenas na direção do seu eixo de rotação que mantém sua posição em relação à ferramenta e à peça [18].

O mandrilamento pode ser definido como sendo uma operação de usinagem de pré-furos fundidos, forjados ou extrudados com ferramenta de geometria definida, onde tanto a ferramenta quanto a peça podem executar o movimento de rotação. O processo é chamado também de

torneamento interno, o qual é usado para aumentar o diâmetro de furos previamente realizados por um outro processo de furação ou fundição [34, 36].

Como se pode perceber, as definições dos processos citados acima possuem muitos pontos em comum. Desta forma, o processo abordado neste trabalho será denominado de mandrilamento, pelo fato de ser esta a denominação utilizada na grande maioria da literatura pesquisada, mesmo quando se trata de processos “híbridos”, ou seja, que apresentam características de outros processos, principalmente de alargamento.

2.10.2 Mandrilamento

A operação de mandrilamento (**Figura 2.26**) é utilizada para aumentar o diâmetro de pré-furos e corrigir a posição de furos garantindo boa qualidade de forma, boa qualidade da superfície e estreitas tolerâncias dimensionais dos cilindros. Estas exigências estão relacionadas às condições de corte e às variações construtivas existentes nas ferramentas de mandrilar.

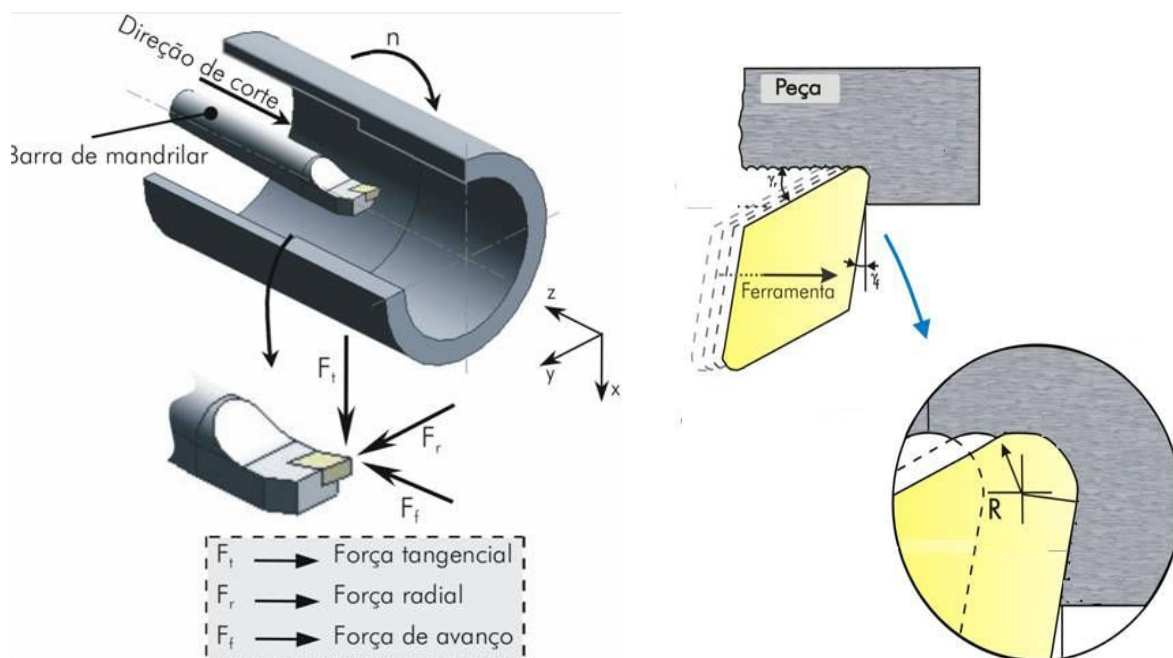


Figura 2.26 – Operação de mandrilamento [9]

a) Variantes das ferramentas de mandrilar

As primeiras ferramentas de mandrilar constavam simplesmente de uma haste com um único inserto para a realização do corte de material (**Figura 2.27**).



Figura 2.27 – Conceção original de uma ferramenta de mandrilar [37]

Com o passar dos anos novos implementos foram criados com o objetivo de melhorar o desempenho das ferramentas. Deste modo, sobre a concepção original da ferramenta de mandrilar foram inseridos novos elementos como o aumento do número de insertos, elementos de guia (característico dos alargadores) e a disposição escalonada dos insertos em relação ao diâmetro (**Figura 2.28**).

Número de insertos



Disposição dos insertos: escalonados



Elementos de guia



Figura 2.28 – Evolução das ferramentas de mandrilar [37, 38, 39]

Barra de mandrilar (**Figura 2.29**) é a denominação dada às ferramentas de mandrilar que não apresentam qualquer tipo de regulação (comprimento e diâmetro fixos). Assim, com uma barra de mandrilar somente podem ser usinados furos em uma determinada faixa de profundidade e com um diâmetro fixo, não havendo a possibilidade de efetuar a correção de raio devido ao desgaste da ferramenta de corte [40].



Figura 2.29 – Barra de mandrilar [37]

Cabeçote de mandrilar (**Figura 2.30**) é a denominação dada às ferramentas de mandrilar que possuem a possibilidade de regulagem de excentricidade da ferramenta. Vários são os sistemas de regulagem, os quais podem ser divididos, segundo o princípio de funcionamento, em dois grupos principais: regulagem somente através do movimento da cápsula da ferramenta e de seu suporte, e regulagem através do movimento de uma haste, onde é fixada a cápsula da ferramenta [40].



Figura 2.30 – Cabeçote de mandrilar [38]

O uso de cabeçotes de mandrilar adequados contribui para a redução de custos no processo melhorando o aproveitamento do potencial da ferramenta de corte e da máquina-ferramenta, reduzindo o capital investido em ferramental e os tempos secundários relacionados à troca de ferramentas ou eventuais correções de excentricidade [40].

Tanto os cabeçotes quanto as barras de mandrilar podem possuir elementos de guias, diferentes quantidades de insertos e escalonamento do diâmetro.

a.1) Ferramenta de mandrilar com elementos de guias

Nos alargadores os elementos de guias têm a função de guiar a ferramenta através da linha de centro do pré-furo e de compensar a ação da força de corte e da força passiva. Os elementos de guia se apóiam na parede do furo e assim impedem a deflexão da ferramenta decorrente da força de usinagem (**Figura 2.31**) [41]. Devido à similaridade construtiva, nas ferramentas de mandrilar, pode-se realizar uma analogia à atuação dos elementos de guias nos alargadores.

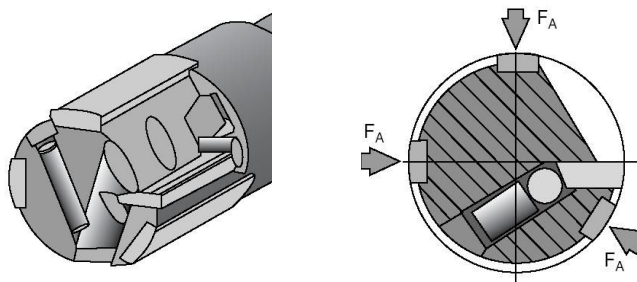


Figura 2.31 – Compensação das forças pelos elementos de guias [42]

Elementos de guias são pastilhas no formato de réguas, normalmente de metal-duro, inseridas nas ferramentas sem a finalidade de remover material da peça (**Figura 2.32**). Como nos alargadores, nas ferramentas de mandrilar a função destes elementos é direcionar a ferramenta, de modo a fazê-la acompanhar a linha de centro do pré-furo e promover o alisamento da parede do furo. O alisamento da parede pelos elementos de guia provoca a deformação plástica da região, conferindo à peça menores valores de rugosidade [35, 43, 44].

O gume secundário também pode atuar como elementos de guia (**Figura 2.32**). Isso depende do ângulo de direção e do comprimento do mesmo. Quanto menor esse ângulo e maior o comprimento do gume, maior a área atingida na parede do cilindro usinado e consequentemente maior a atuação do gume secundário como elemento de guia [42].

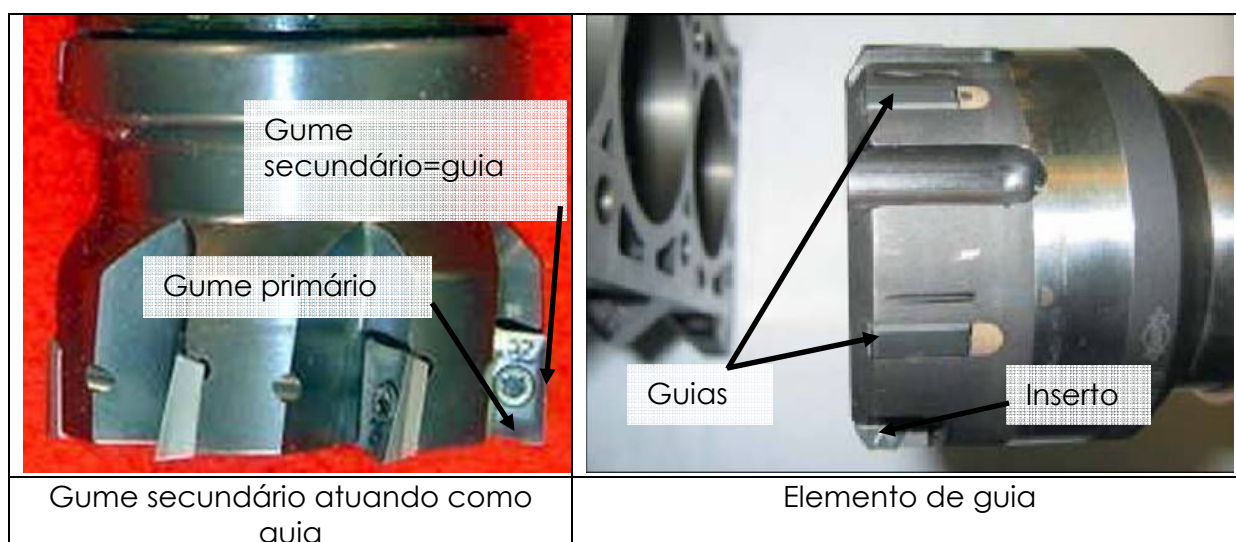


Figura 2.32 – Ferramentas de mandrilar [37, 39]

As guias podem apresentar retificação circular ou chanfrada. Embora a retificação chanfrada permita um melhor acabamento do furo, acarreta uma vida mais curta [42].

Pelo fato dos elementos de guia direcionarem a ferramenta através da linha de centro do pré-furo, isso não permite que problemas de posicionamento e alguns tipos de desvios geométricos sejam corrigidos. Deste modo, caso exista problema de alinhamento entre o centro do cilindro a ser usinado e o centro da ferramenta, esta não é capaz, ou a capacidade fica reduzida, de “abrir” um novo furo um pouco deslocado do pré-furo original (**Figura 2.33**).

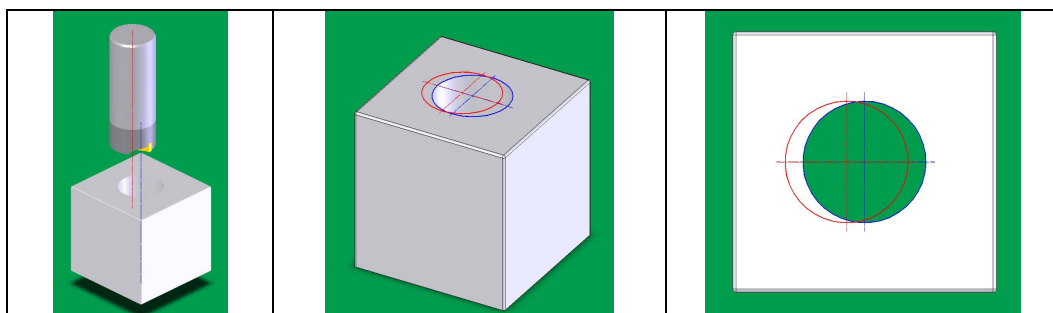


Figura 2.33 – Problema de posicionamento do centro da ferramenta em relação ao centro do pré-furo

Esta característica faz com que a ferramenta seja forçada a entrar no pré-furo, mesmo que deslocado, submetendo a ferramenta à flexão (**Figura 2.34**).

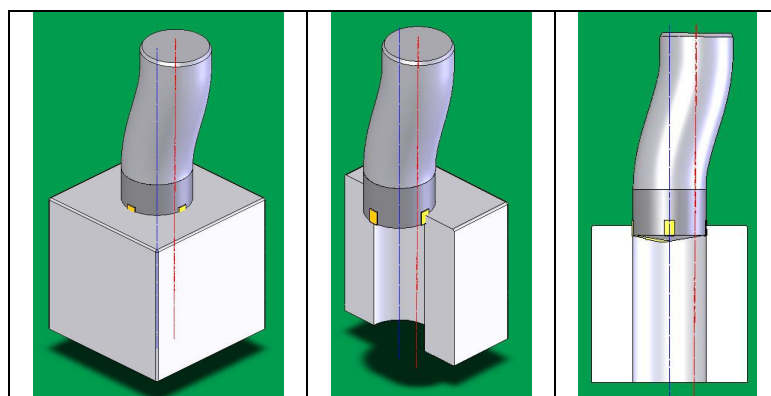


Figura 2.34 – Deflexão da ferramenta devido ao problema de posicionamento

Além do problema de posicionamento, a capacidade da ferramenta de corrigir o problema de desvio forma de retitude fica reduzida. Esse tipo de desvio, como o problema de posicionamento, faz com que a ferramenta fique submetida à flexão devido à deformação sofrida pela mesma ao tentar acompanhar a linha de centro do pré-furo (**Figura 2.35**).

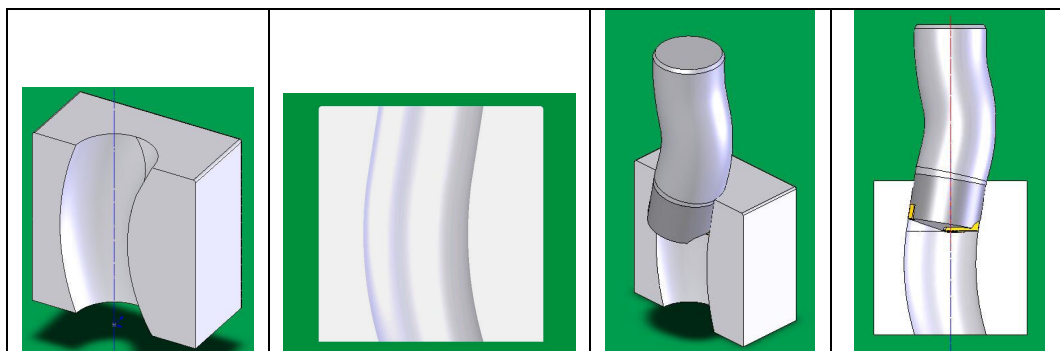


Figura 2.35 – Deflexão da ferramenta devido ao desvio geométrico de retitude acima da tolerância

Devido a esses problemas, a ferramenta quando submetida a algumas dessas situações tem seu desempenho comprometido, acarretando problemas de desgaste excessivo dos inserts, quebra dos inserts e qualidade da peça usinada fora da especificação [43].

Pré-furos com valores de desvios de retitude fora da tolerância podem inviabilizar o mandrilamento com ferramentas possuidoras de elementos de guia. Contudo, o desvio de forma de circularidade é reduzido com essa ferramenta, além de se conseguir valores de tolerâncias dimensionais mais estreitos em relação ao diâmetro [43].

a.2) Ferramenta de mandrilar sem elementos de guias

A ausência de elementos de guia nas ferramentas de mandrilar (**Figura 2.36**) permite a usinagem de furos sem que a ferramenta siga a linha de centro do pré-furo, caso ocorram problemas de posicionamento e de valores de retitude elevados.



Figura 2.36 – Exemplos de ferramentas de mandrilar sem elementos de guia [37]

Esta característica possibilita a obtenção de bons resultados em alguns sentidos, porém prejuízos em outros. A vantagem é que a ferramenta consegue “abrir” um novo caminho independente do pré-furo, caso exista um desvio de retitude acima da tolerância, ou quando exista o problema de posicionamento entre o centro da ferramenta e o centro do pré-furo. Essa característica evita que a ferramenta seja forçada a seguir a linha de centro

do pré-furo, reduzindo problemas ocasionados pela deflexão da ferramenta (**Figura 2.37**).

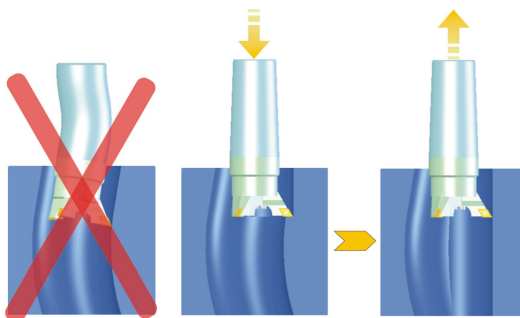


Figura 2.37 – Comportamento da ferramenta sem elementos de guia em peça com desvio de forma de retitude

Como desvantagens, observam-se a piora da qualidade da superfície (rugosidades mais elevadas), problemas com desvios geométricos de circularidade e cilindridade. Além desses problemas, com esse tipo de concepção não se atingem tolerâncias dimensionais tão estreitas quanto às conseguidas com as que utilizam elementos de guia.

Pode-se dizer que a cinemática do mandrilamento é semelhante ao processo de torneamento, quando a ferramenta não apresenta elementos de guia. A qualidade da superfície obtida deve-se principalmente ao avanço da ferramenta, qualidade do gume e níveis de vibrações (**Figura 2.38**).

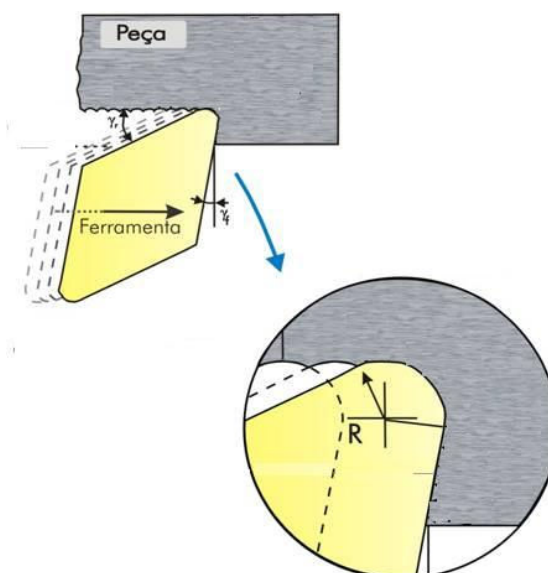


Figura 2.38 – Qualidade da superfície em função do raio do gume e do avanço, como no torneamento [9]

a.3) Quantidade de insertos nas ferramentas de mandrilar

Atualmente, pode-se encontrar ferramentas de mandrilar com um, dois ou mais insertos. Todas elas possuem vantagens e desvantagens umas em relação às outras.

As ferramentas com um único inserto, denominadas de ponta única, possuem principalmente os problemas de deflexão da haste, e o problema de desbalanceamento.

A deflexão da haste ocorre devido às forças de corte e passiva, resultando em desvios geométricos na peça usinada. Dentre estes desvios podem ser citados problemas de tolerância dimensional (estreitamento do diâmetro) e desvios de cilindridade, como conicidade e paralelismo (**Figura 2.39**).

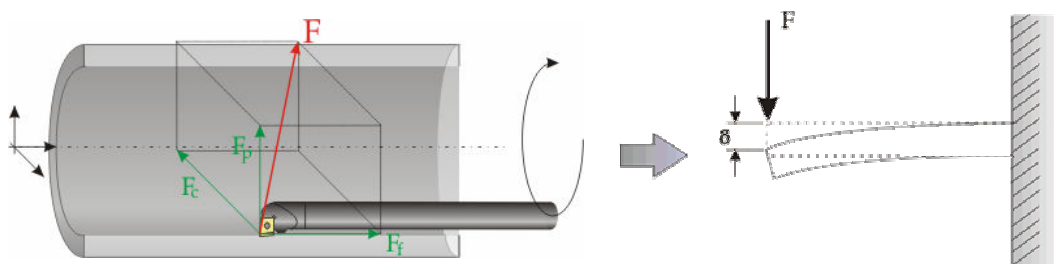


Figura 2.39 – Deflexão da ferramenta de ponta única devido à força de usinagem

Nas ferramentas de ponta única, a força centrípeta existe para qualquer velocidade angular da ferramenta de mandrilamento. Neste caso, em rotações mais elevadas a deflexão da haste de mandrilar provoca erros dimensionais não desprezíveis no furo.

Por outro lado, a ferramenta de ponta única, pelo fato de possuir um diâmetro único proporciona resultados excelentes de circularidade quando submetida a uma pequena força de usinagem. Nas ferramentas com 2 ou mais insertos é difícil a regulação de diâmetros de mesmo valor entre os insertos, devido a problemas de tolerâncias e regulação dos mesmos, prejudicando a circularidade dos cilindros usinados.

Nas ferramentas com dois ou mais insertos distribuídos simetricamente ao redor da ferramenta, o diâmetro é igual ao diâmetro de acabamento do furo, e a distribuição simétrica dos insertos promove o cancelamento das forças no plano perpendicular ao eixo do furo [40]. Nas ferramentas de

ponta única não ocorre esse cancelamento, o que contribui para aumentar a deformação e, assim, a deflexão da mesma.

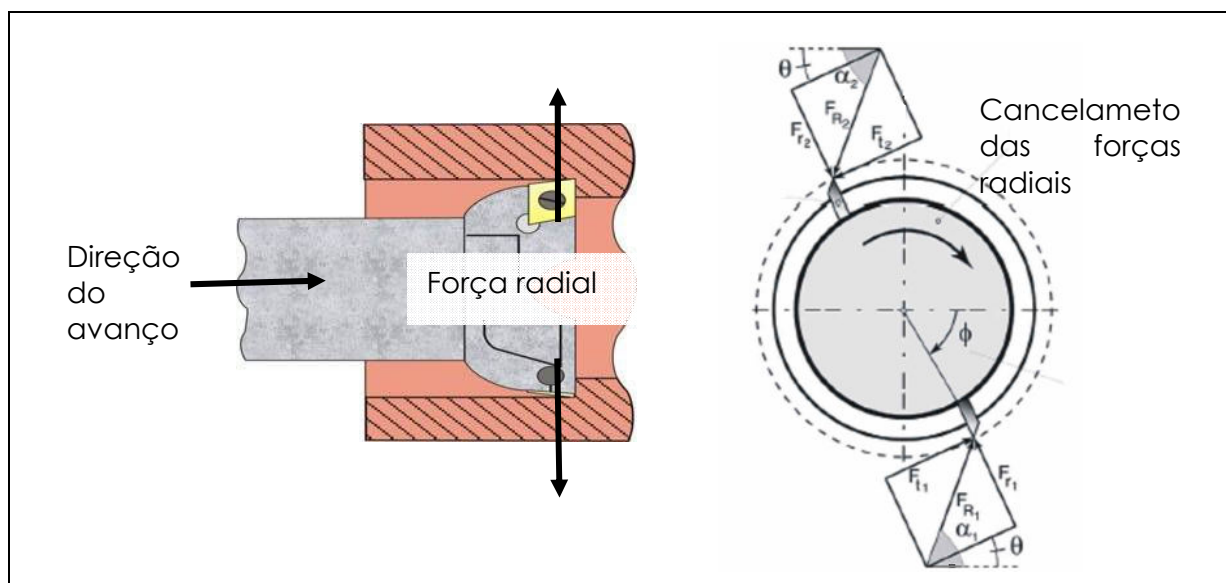


Figura 2.40 – Cabeçote de mandril com 2 insertos [9]

Através do cancelamento das forças passivas, as forças radiais, atuantes no eixo árvore da máquina-ferramenta, deixam de existir. O balanceamento das forças é uma das maiores vantagens ao se utilizar esse tipo de ferramenta, que juntamente com o aumento da rigidez da mesma, permitem a obtenção de furos com menores desvios de forma como retitude, cilindricidade e circularidade [45].

Nas brocas, quando se aumenta o número de canais de 2 para 3 ou 4, ocorre um ganho tanto na qualidade dos furos quanto na produtividade. Em analogia às brocas, espera-se que o mesmo ocorra, à medida que se aumente o número de insertos de 2 para mais, nas ferramentas de mandril.

Em um estudo comparativo entre brocas de 2 e 4 canais quando empregadas na usinagem de ferro fundido cinzento, verificou-se que as brocas de 4 canais produziram furos tão bons como se fossem alargados. As brocas de 4 canais defletem e vibram muito menos que as de 2 canais, especialmente quando se trata de corte interrompido [44].

Foi observado que as brocas de 4 canais são mais rígidas quando comparadas com as de dois canais, pelo fato de possuírem momento de inércia de 5-20% menor em uma das direções principais, mas 65-70% maior em outra direção principal. As brocas de 2 canais tendem a fletir

significativamente na direção principal de baixo momento de inércia. A broca com 4 canais possui o dobro do número de guias de apoio na parede do furo que a broca de 2 canais, o que reduz de maneira significativa o problema de deflexão [44].

Nos testes com as brocas de 2 e 4 canais foram avaliados a tolerância dimensional e a circularidade.

Em relação ao diâmetro dos furos, foi percebido que a deflexão da broca contribui para a obtenção de diâmetros acima do valor pré-setado. Isto é provocado pelas forças radiais, principalmente quando se trata de furos interrompidos (furos que se cruzam), as quais causam a flexão da broca fazendo com que uma fina camada de material seja removida pelos canais da mesma. Nos testes foram observados que este fenômeno foi bastante acentuado nas brocas de 2 canais, sendo que nas de 4 quase não foi observado [44].

A circularidade também é influenciada pelo número de canais das brocas. Melhores resultados foram obtidos com as de 4 canais. Estas forneceram resultados de no mínimo 3 a 8 vezes melhores que as brocas de 2 canais [44].

Através dos resultados de qualidade de forma e dimensional entre as brocas de 2 e 4 canais é possível realizar uma analogia com as ferramentas de mandrilar. Assim como nas brocas, à medida que se aumenta o número de insertos aumentam-se os pontos de apoio da ferramenta na parede do cilindro usinado. Isto proporciona maior estabilidade à ferramenta pelo fato de diminuir as possibilidades de a ferramenta se movimentar na direção radial.

Por outro lado, o maior número de insertos na ferramenta aumenta os problemas de regulação dos mesmos, devido à variação dos diâmetros entre os insertos alocados ao redor da ferramenta. Esta variação dos diâmetros resulta na piora da circularidade do cilindro usinado, pois sempre existirão gumes que não estarão apoiados na parede do cilindro durante a usinagem, ao menos que os diâmetros dos insertos ao redor da ferramenta sejam exatamente o mesmo.

O aumento do número de insertos, além de promover maior estabilidade à ferramenta, proporciona maior distribuição dos mecanismos de desgaste entre os insertos, e consequentemente maior vida à ferramenta, permitindo a utilização de maiores velocidades de avanço sem prejudicar a qualidade da superfície usinada.

O aumento do avanço resulta no aumento da produtividade, porém provoca o aumento da força de usinagem. Isto eleva a potência consumida pela máquina-ferramenta, o que muitas vezes é um fator limitante para o aumento da velocidade do avanço.

a.4) Ferramentas de mandrilar com diâmetros escalonados

Ferramentas de mandrilar com diâmetros escalonados possuem no mesmo corpo duas ou mais ferramentas em diferentes diâmetros (**Figura 2.41**).

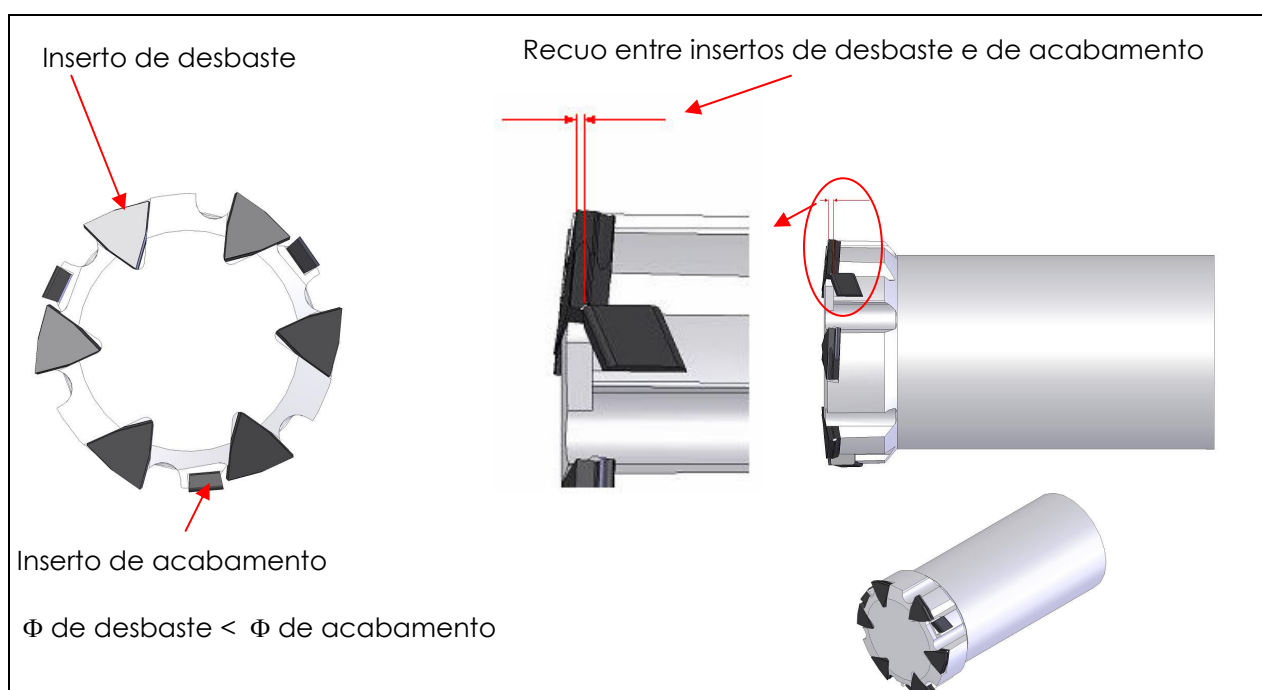


Figura 2.41 – Ferramenta de mandrilar com diâmetros escalonados

Neste tipo de concepção tem-se a divisão do sobre-metal em função da variação do diâmetro, melhorando a distribuição das pressões de corte entre os insertos [27].

O escalonamento do diâmetro faz com que os insertos mais avançados (que possuem o menor diâmetro) funcionem como guias para os mais recuados e vice-versa. Esta construção aumenta a estabilidade da

ferramenta, proporcionando uma auto-correção da trajetória, pois à medida que os insertos mais avançados tendem a desviar a sua trajetória os mais recuados os impedem.

No mandrilamento ferramentas escalonadas podem ser utilizadas em operações de desbaste como em acabamento. Com o escalonamento dos insertos é possível ajustar a profundidade de corte dos insertos recuados frente aos avançados, de maneira a se conseguir aumento da vida da ferramenta e melhora da qualidade da peça mandrilada [27].

Acreditando nesse tipo de concepção, a Ingersoll Werkzeuge GmbH, após testes extensivos com diferentes *layouts* de ferramentas, encontrou melhoras no desempenho de uma ferramenta de mandrilar destinada à usinagem de ferro fundido vermicular, utilizando uma disposição escalonada de insertos. Nos testes verificou-se que o escalonamento dos insertos permite manter a cilindridade desejada, a qualidade da superfície e a rugosidade do perfil mandrilado dentro das tolerâncias requeridas em um número considerável de cilindros, e a utilização de maiores velocidades de avanço aumentando a produtividade [22].

Além de ganhos com qualidade de forma na peça, as ferramentas escalonadas proporcionam maior flexibilidade e redução do número de operações no mandrilamento, pois a possibilidade de alocar insertos de desbaste, semi-acabamento e acabamento reduz o número de ferramentas necessárias para a usinagem total de uma peça. A Trane Company, Pueblo, CO., utilizava 12 barras de mandrilar para usinar uma série de furos. Através do desenvolvimento de barras com três diferentes tipos de insertos pela BIG Kaiser Precision o número de ferramentas necessárias diminuiu de 12 para 4 o número de barras para realizar a operação completa de usinagem dos furos [46].

A empresa Komet Präzisionswerkzeuge, fabricante de ferramentas, após sucessivos testes com diferentes concepções de ferramentas de mandrilar, concluiu que ferramentas escalonadas permitem maiores velocidades de avanço e, portanto, aumento na produtividade. Entretanto, aumenta-se o torque e a potência necessários [47].

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais, equipamentos, métodos e as ferramentas utilizadas na execução dos ensaios. Com os ensaios foram obtidos os resultados de vida da ferramenta, produtividade, circularidade, retitude, cilindridade e diâmetros dos cilindros. Os testes foram realizados na empresa parceira, em condições reais de trabalho, utilizando a mesma máquina da linha de produção. As análises dos resultados foram realizadas no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.1 Corpos de Prova

Os corpos de prova utilizados foram os blocos de motores V6 (**Figura 3.1**).

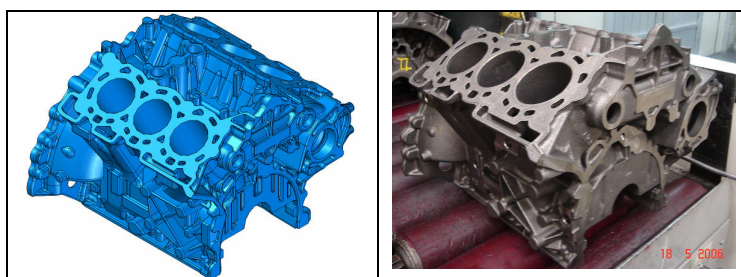


Figura 3.1 – Bloco V6 utilizado como corpo de prova [9]

O comprimento do cilindro é de 148,69 mm e o diâmetro após o desbaste é de 79,895 +/- 0,20mm. A quantidade média de sobremetal é de 3,5mm no raio do cilindro.

O material dos blocos é o ferro fundido vermicular. As propriedades mecânicas são:

- Dureza da superfície: 223 [Brinell];
- Limite de resistência: 508 [Mpa];
- Limite de escoamento: 393 [Mpa];

A composição química obtida via espectrômetro é apresentada na **Tabela 3.1** e os obtidos via quimitron são apresentados na **Tabela 3.2**.

Tabela 3.1 - Composição química obtida via espectrômetro

Elemento (%)	Si	Mn	P	Cr	Ti	Sn	Cu	Ni
Encontrado	2,11	0,305	0,028	0,027	0,010	0,053	0,872	0,013

Tabela 3.2 - Composição química obtida via quimitron

Elemento (%)	C	S
Encontrado	3,58	0,009

A microestrutura apresenta 9% de nodularização e 8% de ferrita.

Em relação à caracterização construtiva do bloco, a distância entre os centros dos cilindros e a inclinação dos cilindros bruto coincide com a distância entre os centros dos cilindros e inclinação dos cilindros usinados dentro da média considerada pela tolerância de fundição estabelecida pelo processo e pelo cliente. A empresa parceira não forneceu valores que caracterizam esta tolerância.

Em relação ao processo de fundição os blocos não são fundidos a partir de um mesmo molde, já que o objetivo da empresa é otimizar a fabricação de blocos produzindo a maior quantidade possível ao mesmo tempo.

3.2 Máquina-ferramenta

Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem (**Figura 3.2**), com as seguintes características:

- Marca Yamazaki Mazak;
- Modelo FH 6800 Hi-Torque;
- Potência máxima: 22 kW.
- Torque máximo: 94 kgf*m;
- Rotação máxima: 7000 rpm;
- Pressão do fluido de corte: 18 – 20 bar;
- Fluido de corte: Emulsão - Hysol 6545.



Figura 3.2 – Centro de usinagem utilizado para a execução dos testes

3.3 Ferramentas de Mandrilar

Foram ensaiadas ferramentas de mandrilar provenientes de diferentes fabricantes de ferramentas. As principais diferenças construtivas existentes entre as elas são: número de insertos, insertos escalonados ou não, a presença ou não de elementos de guia e gume secundário atuando como elemento de guia.

A identificação dos elementos e dos detalhes construtivos das ferramentas analisadas foi feita através dos desenhos dos perfis e fotos das ferramentas.

Por questões de exigência de sigilo tecnológico os fornecedores não forneceram informações a respeito do material do substrato e do recobrimento das pastilhas utilizadas pelas ferramentas.

3.3.1 Ferramenta A

A ferramenta A (**Figura 3.3**) apresenta como principais características construtivas:

- Ferramenta escalonada com 6 insertos de desbaste e 3 de acabamento;
- Recuo axial entre os insertos de desbaste e acabamento de 1,18mm;
- Diâmetro dos insertos de desbaste: 79,47mm;
- Diâmetro dos insertos de acabamento: 79,99mm;
- Variação no diâmetro entre os insertos de desbaste e acabamento: 0,52mm;

- Ângulos de direção do gume secundário do inserto de desbaste e de acabamento, respectivamente: 1° e 1° ;
- Ângulos de direção do gume primário dos insertos de desbaste e acabamento, respectivamente: 6° e 1° .

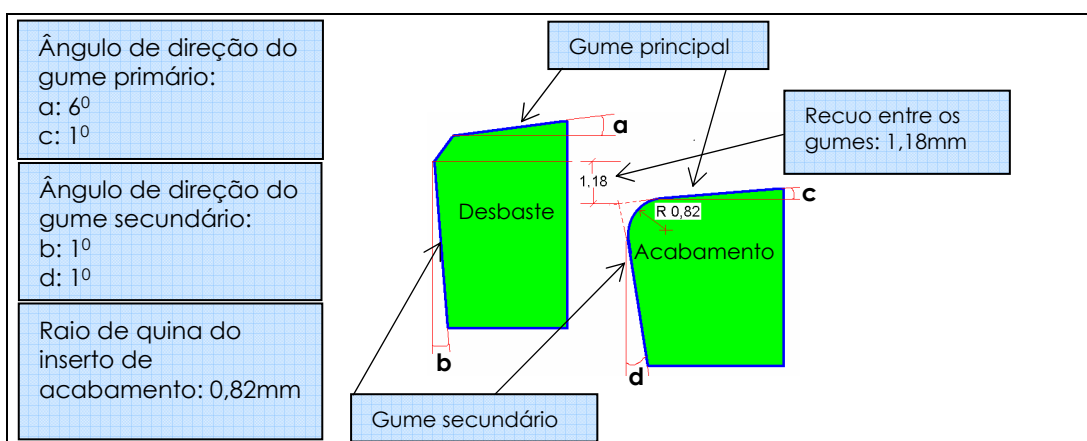
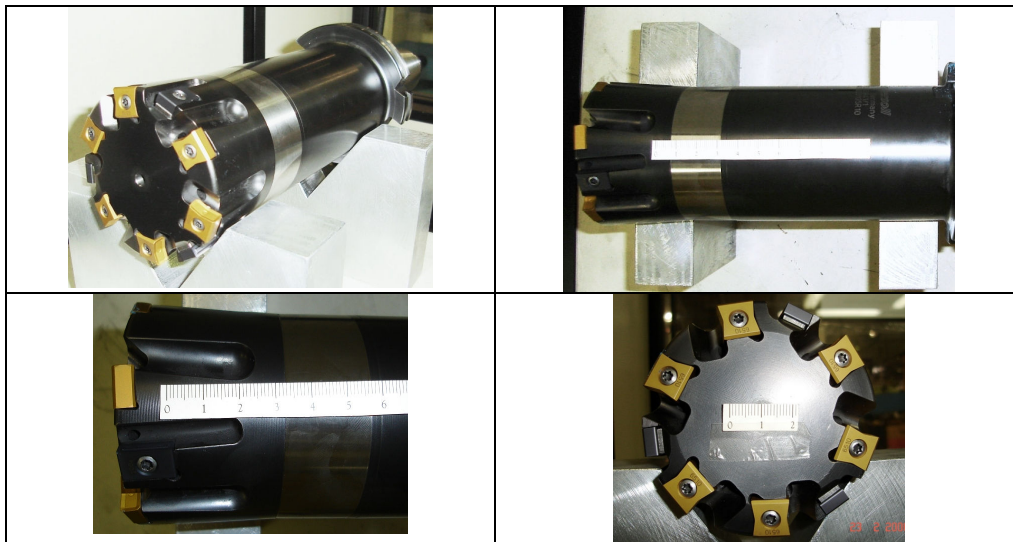


Figura 3.3 – Características construtivas da ferramenta A

3.3.2 Ferramenta B

A ferramenta B (**Figura 3.4**) apresenta como principais características construtivas:

- Ferramenta escalonada com 6 insertos de desbaste e 3 de acabamento;
- Recuo axial entre os insertos de desbaste e acabamento: 2,90mm;
- Diâmetro dos insertos de desbaste: 79,58mm;
- Diâmetro dos insertos de acabamento: 79,95mm;

- Variação no diâmetro entre os insertos de desbaste e acabamento: 0,37mm;
- Ângulos de direção do gume secundário dos insertos de desbaste e acabamento, respectivamente: 1° e 1° ;
- Ângulos de direção do gume principal dos insertos de desbaste e acabamento, respectivamente: 6° e -1° .

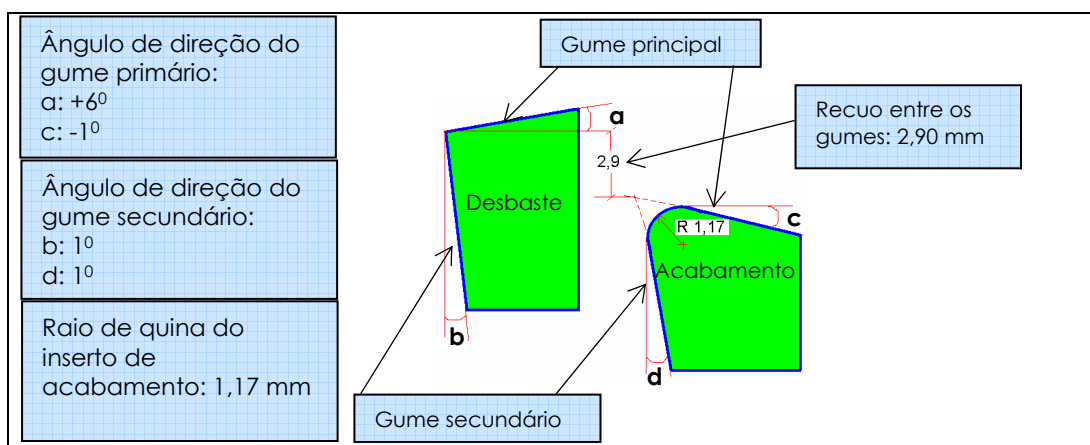


Figura 3.4 – Características construtivas da ferramenta B

3.3.3 Ferramenta C

A ferramenta C (**Figura 3.5**) apresenta como principais características construtivas:

- Ferramenta com 5 insertos sem escalonamento;
- Diâmetro dos insertos: 79,99mm;
- Ângulo de direção do gume secundário: 2° ;
- Ângulo de direção do gume principal: 17° .

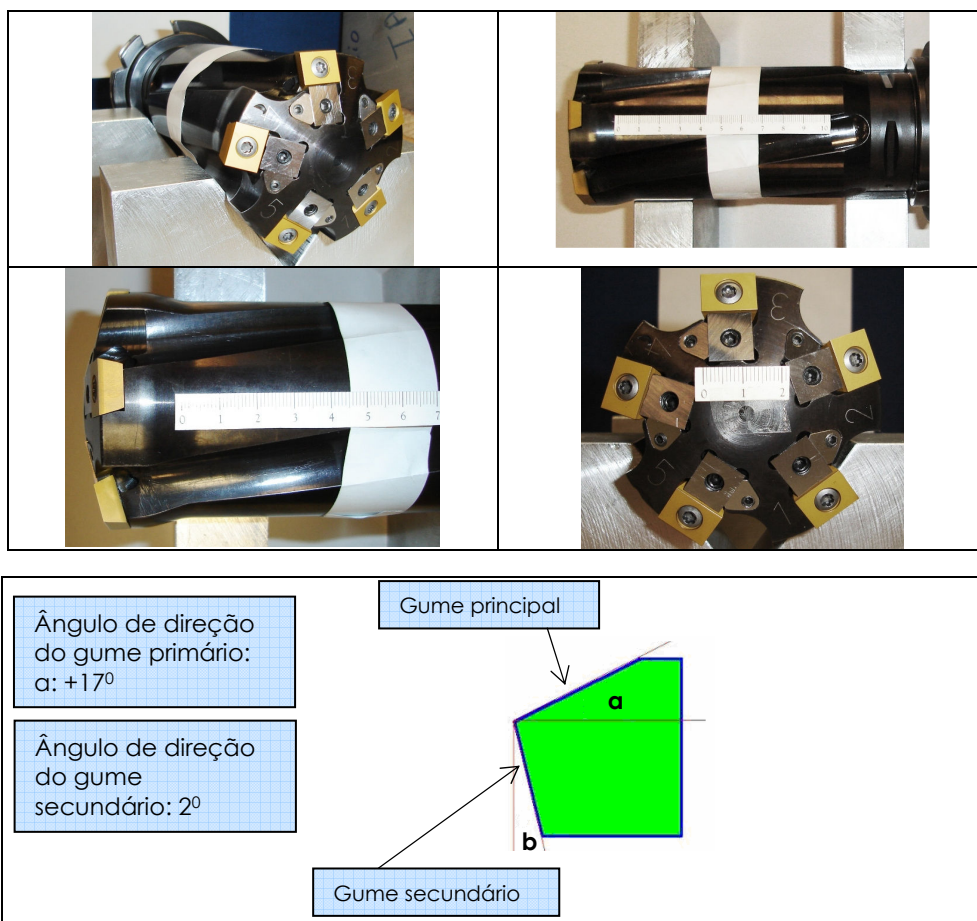


Figura 3.5 – Características construtivas da ferramenta C

3.3.4 Ferramenta D

A ferramenta D (**Figura 3.6**) apresenta como principais características construtivas:

- Ferramenta com 4 insertos sem escalonamento;
- Diâmetro dos insertos: 79,90mm;
- Ângulo de direção do gume secundário: 1° ;
- Ângulo de direção do gume principal: 1° .

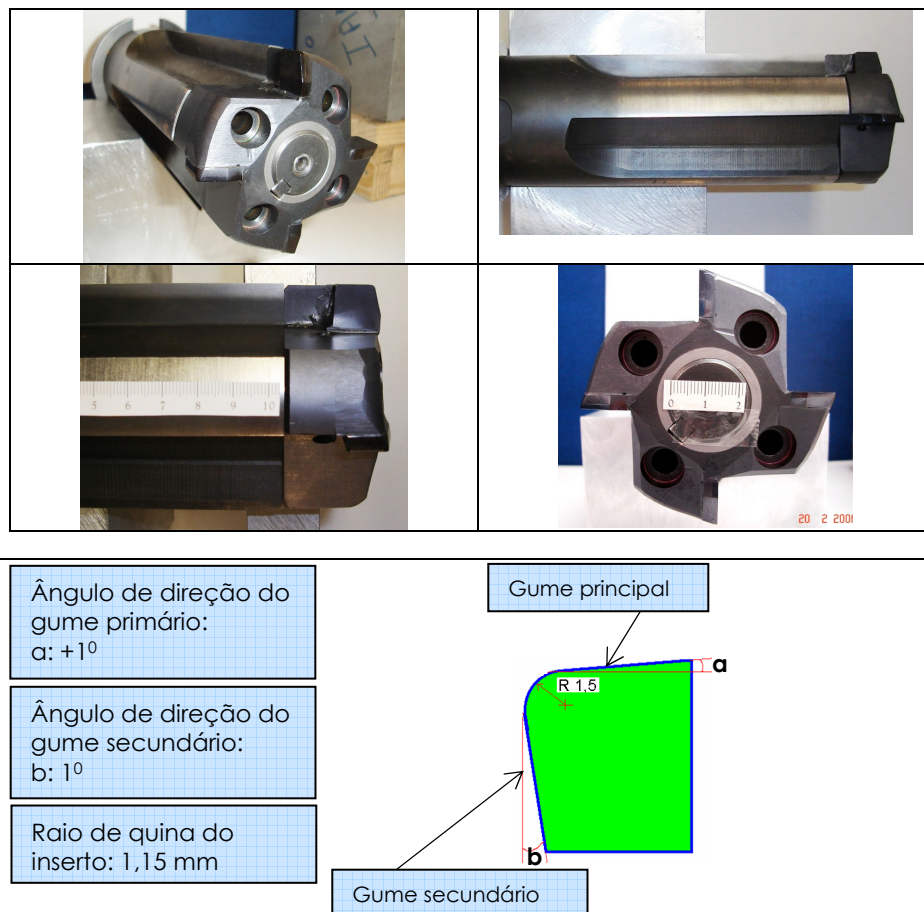


Figura 3.6 – Características construtivas da ferramenta D

3.4 Sistema de Aquisição das Imagens do Desgaste dos Insertos

A aquisição das imagens dos desgastes foi realizada através dos seguintes equipamentos pertencentes à empresa parceira (**Figura 3.7**):

- Câmera CCD da marca Pro-Series High Performance CCD;
- Software de aquisição de imagens: Image Pro Plus, versão 4.1.0.0 da marca Media Cybernetics LP;
- Microscópio Carton utilizando aumento de 25–30 vezes.



Figura 3.7 – Equipamentos utilizados para aquisição e medição do desgaste dos insertos

O procedimento consistiu da aquisição e armazenamento de imagens (fotos) das ferramentas ao atingirem o final de vida.

3.5 Sistema de Medição

3.5.1 Máquina de Medição dos Desvios de Forma

O sistema de medição utilizado para a realização das medições foi uma máquina de medir por coordenadas da marca Carl Zeiss, modelo Prismo Navigator (**Figura 3.8**). Tal equipamento pertence à empresa parceira.



Figura 3.8 – Máquina de medição dos desvios de forma

A incerteza de medição desta máquina corresponde a: $U(3D) = \pm (1,5 + L/350)\mu\text{m}$.

Após a usinagem, os blocos correspondentes ao início e final de vida da ferramenta foram mantidos na sala de medição para serem climatizados durante 24 horas e, posteriormente, medidos.

a) Condições ambientais

A sala onde foram realizadas as medições possui um sistema de climatização que proporciona as seguintes condições de temperatura e umidade:

- Temperatura: $(20,0 \pm 0,3) ^\circ\text{C}$;
- Umidade relativa: $(50 \pm 10) \%$.

b) Procedimento de medição

Com as medições foram extraídos os seguintes resultados de desvios geométricos:

- Retitude;
- Circularidade;
- Cilindricidade;
- Diâmetro.

A escolha dos parâmetros e dispositivos para as medições foi realizada segundo a norma ISO 12180-2 [48] (GPS – Cilindricidade: especificação de parâmetros), para a medição de cilindros com diâmetro de 80mm. Tais parâmetros e dispositivos são:

- Apalpador: esférico de 1,0mm de diâmetro (norma ISO 12180-2 [48]);
- Circularidade: obtenção em 7 seções, nas posições: 10, 31, 52, 73, 94, 115 e 138mm ao longo do comprimento do cilindro. Segundo norma ISO 12180-2 [48] para comprimento de cilindro (H) maior 2,3 mm tem-se H/20 (**Figura 3.9**);
- Retitude: obtenção de 4 geratrizes em 0, 90, 180 e 270 graus (**Figura 3.9**);
- Cilindricidade: as mesmas posições de medição utilizadas pela circularidade e retitude;
- Velocidade de medição: 10 mm/s (velocidades maiores que 10 mm/s pode provocar interferências no sinal de captação dos dados [12]);
- Filtro gaussiano para as medições de circularidade e retitude: 50 ondas/volta. Segundo a norma ISO 12180-2 [48], o número de ondas por volta indicado para cilindros com diâmetro de 80 mm é 150, entretanto devido ao excessivo tempo de medição com filtro de 150 ondas/volta, foi estabelecido pela empresa parceira o valor de filtro gaussiano de 50 ondas/volta. Por se tratar de uma análise comparativa entre os resultados obtidos com as

ferramentas, o valor de 50 ondas/volta estabelecido para o filtro gaussiano já fornece resultados suficientes para a comparação;

- Quantidade de pontos obtidos: $7 \times$ valor do filtro gaussiano = 350 pontos (ISO 12180-2 [48]);
- Eliminação de pontos extrapolados com desvio maior que 3 vezes o desvio padrão;
- *Cut-off* de 0,8mm (norma ISO 12180-2 [48])
- Força de medição de 0,2 N;
- Realização de 1 ciclo de medição.

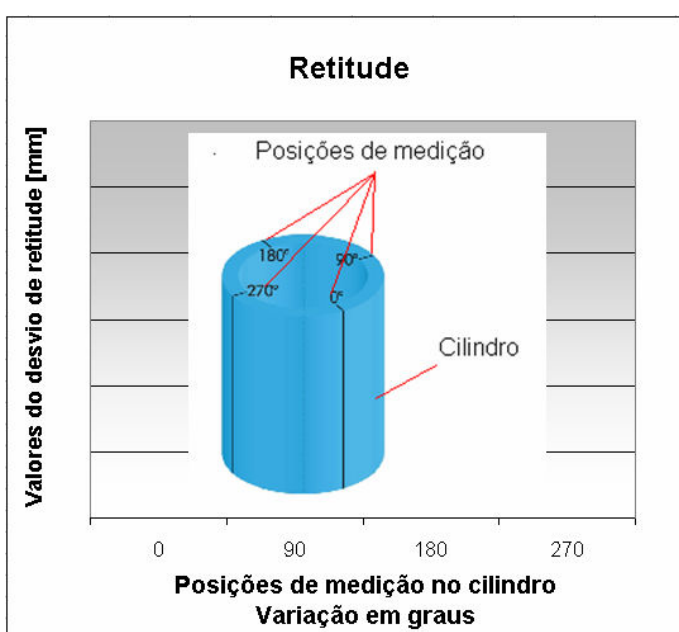
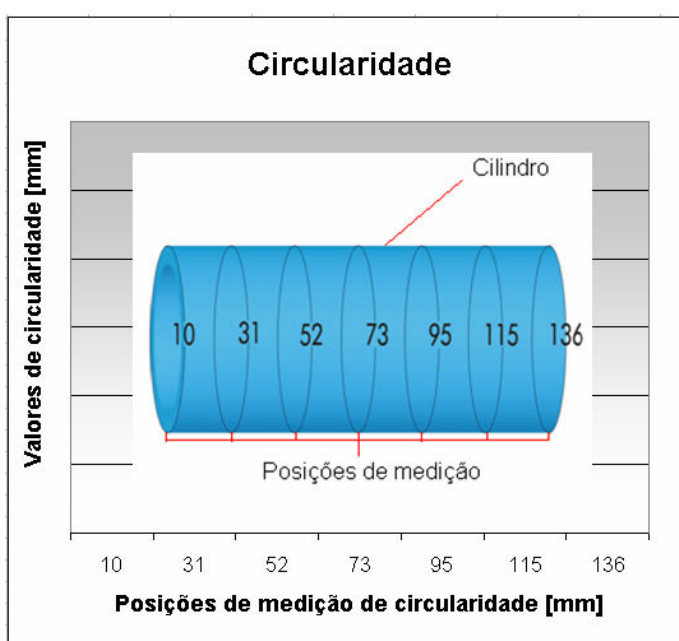


Figura 3.9 – Posições de medição no cilindro

Nos gráficos de análise de retitude, circularidade e cilindricidade são utilizadas abreviações que identificam as ferramentas e as condições de corte. Tais abreviações são mostradas na **Tabela 3.3**.

Tabela 3.3 – Abreviações utilizados nos gráficos de retitude, circularidade e cilindricidade para identificar as ferramentas e as condições de corte

Identificação das condições de corte
IV = condição de início de vida da ferramenta
FV = condição de fim de vida da ferramenta
v_c = velocidade de corte em m/min
f = avanço em mm/min
Identificação da ferramenta
F. A = ferramenta A
F. B = ferramenta B
F. C = ferramenta C
F. D = ferramenta D

Como exemplo, no gráfico de análise de retitude da **Figura 3.10** é explicitada a legenda:

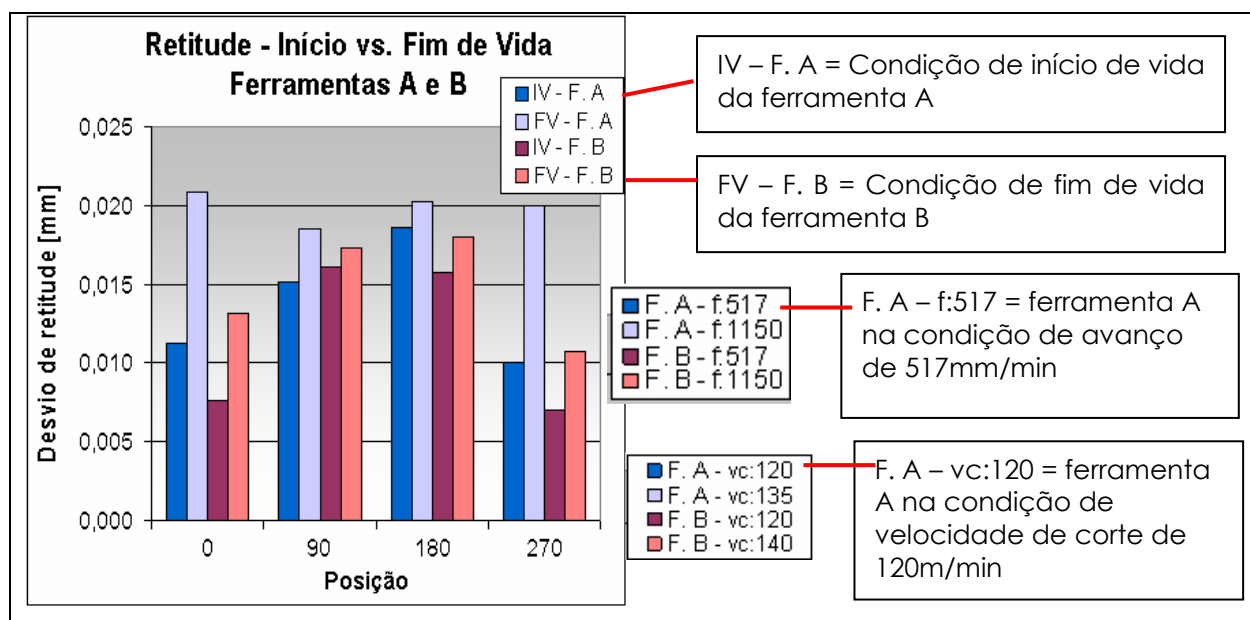


Figura 3.10 – Exemplo para identificar o significado das legendas

As medições dos diâmetros foram realizadas em todos os cilindros a cada 10 blocos usinados. Tais medições foram feitas nas profundidades de 10 e 100mm. Este procedimento foi utilizado para verificar a evolução do diâmetro dos cilindros ao longo da vida da ferramenta, além de realizar possíveis correções no sistema de referência do centro de usinagem.

A medição do diâmetro foi realizada em outra máquina de medição por coordenada dedicada apenas para medir diâmetros dos cilindros dos blocos na produção. Para as medições, os blocos não foram climatizados e foram medidos logo após a usinagem.

A representação dos valores dos diâmetros nos gráficos é exemplificada na **Figura 3.11**.

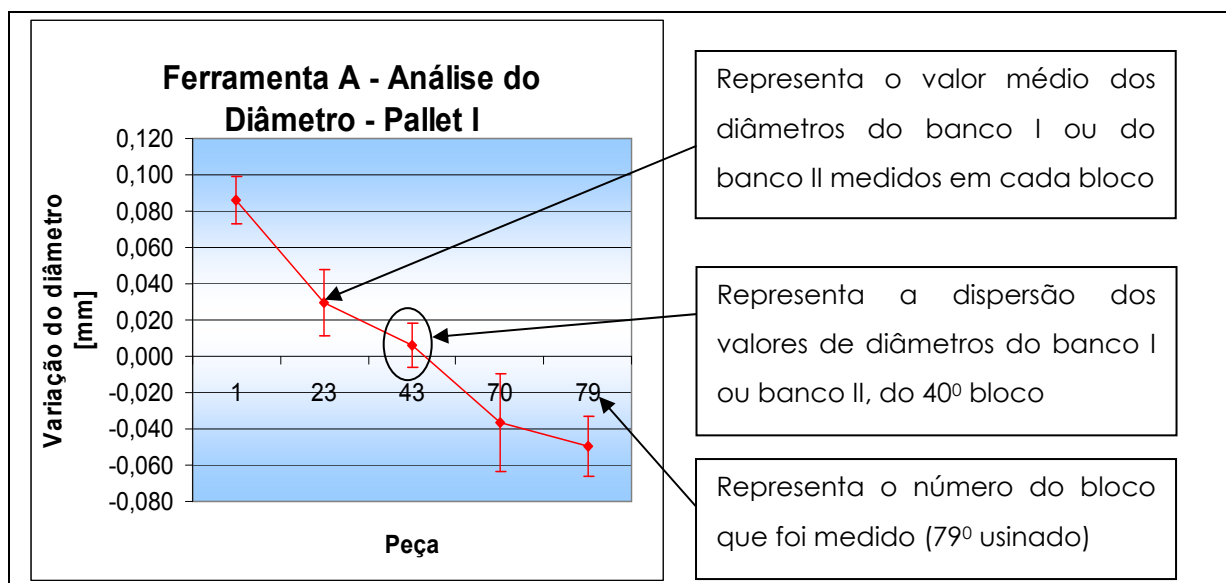


Figura 3.11 – Representação do gráfico de análise dos resultados de diâmetro

Para a extração do valor do diâmetro foi utilizado o círculo de referência de mínimos quadrados (LSCI – *Least squares reference circle*), círculo no qual a soma dos quadrados dos desvios locais é mínima.

Não foram utilizadas as medições dos desvios de forma para avaliar o diâmetro, pois nestas foram utilizados apenas os blocos de início e fim de vida, impossibilitando o controle dimensional dos diâmetros dos cilindros ao longo da vida da ferramenta. Não foram aproveitados os valores dos diâmetros das medições de forma, pois as condições como umidade, temperatura e a máquina de medição por coordenada eram diferentes das utilizadas nas medições de diâmetro realizadas na produção.

3.6 Pre-set da Ferramenta

Antes de serem colocadas na máquina foram realizados o *pre-set* de todas as ferramentas como forma de garantir a integridade das mesmas e dos ensaios.

O *pre-set* constituiu em regular o diâmetro dos insertos alocados ao redor da ferramenta em uma faixa de tolerância de 0,02mm. Tal tolerância é suficiente para garantir o desgaste equilibrado dos insertos e a qualidade da superfície do cilindro.

3.7 Ensaios

Para a realização dos ensaios foi empregada uma metodologia que garantiu a repetibilidade dos ensaios, o controle do processo e a confiabilidade dos resultados obtidos, a partir dos seguintes passos:

1. Dois parâmetros de corte: o parâmetro normal de produção e o escolhido para o ensaio (mais agressivo);
2. Em cada bloco 3 cilindros são usinados com os parâmetros atuais de produção e 3 cilindros nas condições de trabalho mais severas (estas escolhidas na direção de maior rigidez do sistema de fixação);
3. Usinagem de 3 blocos iniciais (18 cilindros) para a correta adequação dos parâmetros escolhidos;
4. “Bloco início de vida”: caso não ocorra qualquer problema, após a usinagem dos blocos iniciais, usina-se o bloco de início de vida, para obter os valores de medição dos desvios de forma e dimensional dos cilindros;
5. Após a usinagem do bloco “início de vida” os testes continuam nos mesmos moldes descritos no item 2;
6. Inspeção visual da máquina e da ferramenta a cada 5 blocos usinados;
7. Medição dos diâmetros a cada 10 blocos usinados;
8. “Bloco final de vida”: será o último bloco usinado antes do bloco que atingiu um dos critérios de fim de vida descritos no subtítulo 3.8 (ver adiante);
9. Os blocos são limpos e lubrificados para evitar a corrosão, e levados em seguida para a sala de medição. Nesta são

mantidos por 24 horas para climatização e, posteriormente, medidos.

Os bancos I e II são os lados dos blocos onde estão localizados os cilindros 710, 711, 712 e 610, 611, 612, respectivamente (**Figura 3.12**).

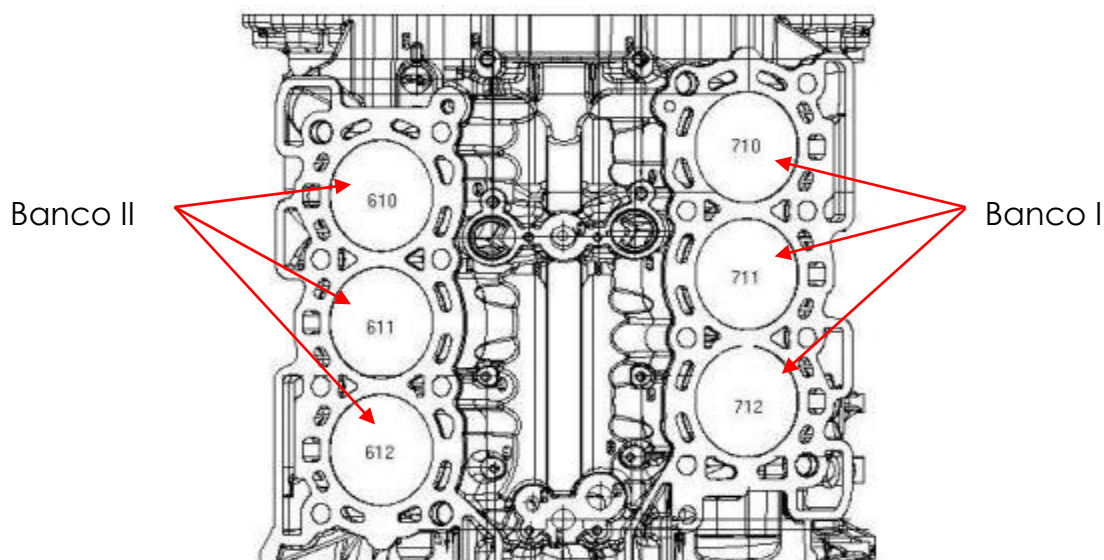


Figura 3.12 – Identificação e posicionamento dos cilindros no bloco

Nas medições de circularidade e retitude os valores apresentados em cada posição de medição correspondem à media dos valores dos 3 cilindros do banco I ou dos 3 do banco II.

As condições de corte para cada ferramenta são mostradas na **Tabela**

3.4

Tabela 3.4 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios

Parâmetros de corte nos ensaios				
Ferramenta	v_c (m/min)	f		
		(mm/min)	inserto desbaste (mm/gume)	inserto acabam. (mm/gume)
A	120	517	0,18	0,36
	135	517	0,16	0,32
	120	1150	0,4	0,8
	135	1270	0,39	0,79
B	120	517	0,18	0,36
	140	517	0,15	0,31
	120	1150	0,4	0,8
	140	1270	0,38	0,76
C	135	517	0,19	
D	100	517	0,32	
	100	640	0,4	

3.8 Critério de Fim de Vida

O fim de vida é constatado mediante os seguintes critérios:

- Quando o valor do diâmetro do cilindro atingir o valor da tolerância;
- Quando a indicação de potência da máquina-ferramenta ultrapassar os 100%;
- Quando for verificada a presença de riscos profundos na parede do cilindro normalmente ocorridos durante a saída da ferramenta (riscos superiores a 0,09mm);
- Quando for verificada qualquer irregularidade na superfície usinada, como presença de rebarbas e outros defeitos.

Assim que um desses critérios for observado, tem-se o encerramento dos ensaios para a ferramenta em teste.

3.9 Tratamento Estatístico das Medições

A estatística fornece uma estrutura para descrever a variabilidade e para aprender sobre quais fontes potenciais de variabilidade são mais importantes ou quais têm o maior impacto no desempenho daquilo que está em análise [49].

Na análise dos resultados de medições dos desvios de forma e dimensional dos cilindros serão utilizadas as seguintes ferramentas estatísticas para caracterizar o desempenho das ferramentas: a média aritmética e a variabilidade ou dispersão dos dados da amostra.

Através da média aritmética comum (**Eq 3.1**), pode-se caracterizar a localização ou tendência central nos dados. Embora a média da amostra seja útil, ela não transmite toda a informação acerca de uma amostra de dados [49].

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.1)$$

A variabilidade ou dispersão dos dados pode ser descrita pela variância ou desvio-padrão da amostra (**Eq 3.2**). Se a variância da amostra for pequena haverá pouca variabilidade nos dados, porém se a variância for grande a variabilidade será relativamente grande [49].

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (3.2)$$

Na medição dos desvios de forma de circularidade e de retitude será utilizada como ferramenta estatística a média aritmética. A dispersão não será utilizada, pois o tamanho da amostra que caracterizam estes desvios de forma é pequeno (3 medições para cada posição de medição).

Para a medição do diâmetro será utilizado a média e a dispersão, pois a média foi obtida considerando todos os cilindros medidos em cada bloco sem distinção da posição de medição, resultando numa amostra de 6 medições para cada bloco medido.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com o levantamento dos valores de potência indicados pela máquina-ferramenta, com as medições dos desvios de forma de retitude, de circularidade, de cilindridade, os desvios dimensionais dos cilindros, a produtividade e a vida das ferramentas.

Através dos resultados levantados com as curvas de potência, são analisadas as influências do material, da vida, da geometria da ferramenta e do avanço sobre a potência de usinagem. Com os resultados obtidos com os desvios geométricos de retitude, circularidade e cilindridade, são analisadas as variações ocasionadas nestes desvios nas condições de início e de fim de vida da ferramenta, para diferentes valores de avanço, de velocidade de corte e de materiais de ferramentas, e para a condição de mesma produtividade entre as ferramentas.

Na análise para a condição de mesma produtividade adota-se o mesmo avanço para todas as ferramentas. Assim, são avaliados os resultados de circularidade, de retitude, de cilindridade, fazendo-se uso de avanço de 517mm/min.

Na análise de tolerância dimensional são analisadas as variações dos valores dos diâmetros obtidos ao longo da vida das ferramentas, correlacionado-as às diferenças construtivas existentes entre elas.

4.1 Pré-ensaios

4.1.1 Caracterização dos *Pallets* I e II

O dispositivo de fixação do bloco na máquina-ferramenta possui dois lados de fixação denominados de *pallet* I e *pallet* II. Estes dois lados permitem que enquanto uma peça está sendo usinada, outra peça possa ser fixada no dispositivo.

Considerando-se a possibilidade de existência de diferenças de qualidade para peças produzidas estando as mesmas fixadas no *pallet* I ou

pallet II, foram analisados o diâmetro, os desvios geométricos de retitude, circularidade e cilindricidade de peças usinadas tanto em um *pallet* quanto em outro.

a) Análise do diâmetro

Para verificar a existência de variações no valor do diâmetro das peças usinadas, estando elas fixadas no *pallet* I ou II, foram realizadas as medições dos cilindros usinados pela ferramenta A, nas condições de avanço de 1150mm/min (0,4mm/gume e 0,8mm/gume para os insertos de desbaste e acabamento, respectivamente), e velocidade de corte de 120m/min (**Figura 4.1**).

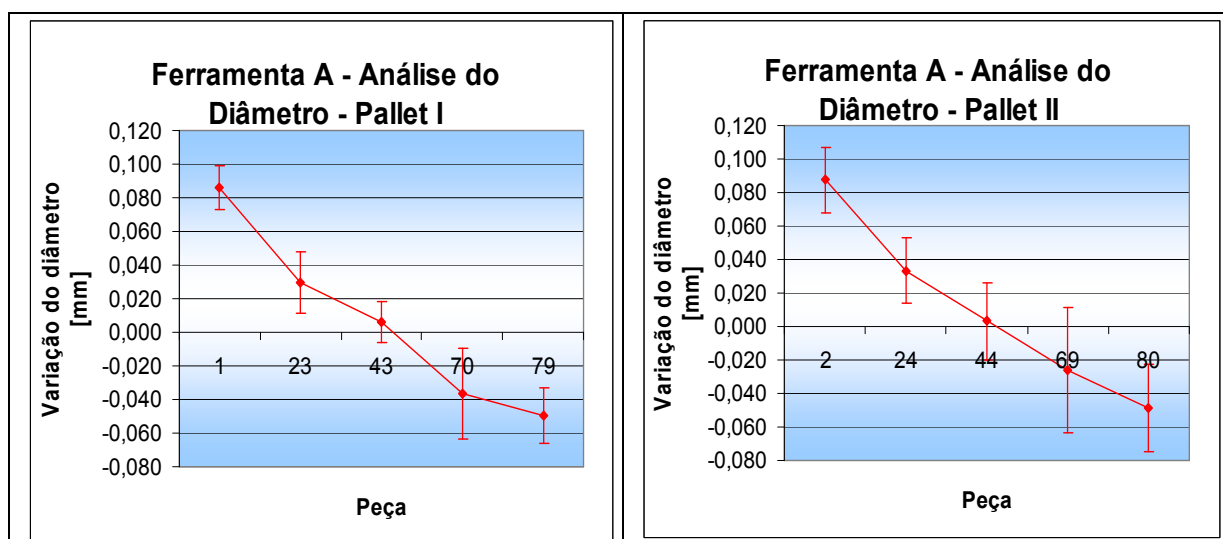


Figura 4.1 – Comparação dos valores dos diâmetros obtidos pelas peças fixadas nos *pallets* I e II, respectivamente

Nos gráficos da **Figura 4.1** são apresentados a média dos resultados das medições dos três cilindros de cada bloco (cilindros correspondentes ao banco I), para cada peça medida, e os intervalos de confiança para uma probabilidade de 95%. As reduções dos diâmetros obtidas com a diferença dos valores da primeira e da última peça usinada, considerando as dispersões, foram de 0,17mm e 0,18mm para a peça fixada no *pallet* I e no II, respectivamente.

A diferença encontrada em relação à redução do diâmetro foi de aproximadamente 0,01mm. Esta não é considerada uma diferença significativa, em se tratando de análise de ferramentas de mandrilar voltadas

para a operação de desbaste. Considera-se assim, que em relação ao parâmetro diâmetro, a fixação do bloco em um ou outro *pallet* não traz diferenças significativas.

4.2 Análise de Retitude, Circularidade e Cilindricidade

Para avaliar a relação dos *pallets* I e II sobre a qualidade de forma dos cilindros são mostrados na **Figura 4.2** os resultados de retitude, circularidade e cilindridade obtidos com os ensaios da ferramenta B nas condições de corte de avanço 1150mm/min (0,4mm/gume e 0,8mm/gume nos insertos de desbaste e acabamento, respectivamente), e velocidade de corte 120m/min.

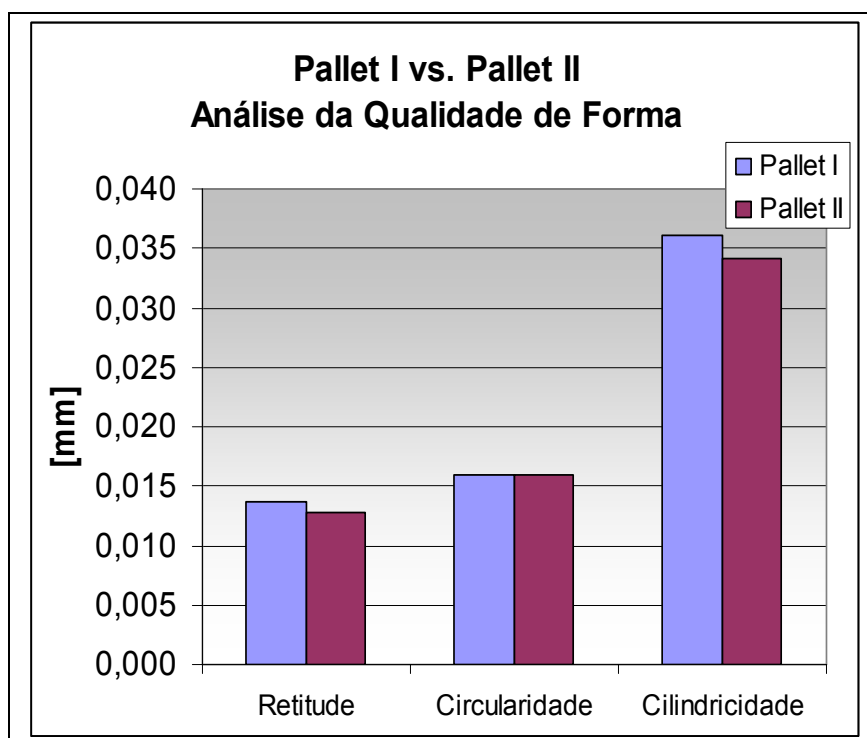


Figura 4.2 – Comparação dos valores de retitude e circularidade das peças fixadas nos *pallets* I e II

Na análise dos resultados de retitude, os valores médios obtidos foram de 0,013mm e 0,012mm para os *pallets* I e II, respectivamente. Na análise de circularidade os valores foram de 0,015mm. Na cilindridade os valores obtidos foram de 0,036mm e 0,034mm para o *pallets* I e II, respectivamente. Tem-se assim, diferenças não significativas para a análise de qualidade de forma quando a peça é fixada no *pallet* I ou no *pallet* II.

Constata-se que as diferenças dos desvios de forma mencionados acima, não ultrapassam 0,02mm, ao se utilizar o *pallet* I ou o II. Tais diferenças não são consideradas significativas, já que a análise é voltada para o mandrilamento de desbaste dos cilindros.

4.3 Análise das Curvas de Potência

Os dados para elaboração das curvas de potência foram obtidos pela leitura da potência indicada no painel da máquina-ferramenta durante os ensaios. Esta potência refere-se à energia consumida pela máquina-ferramenta durante a usinagem. Foram anotados os valores da potência relacionando-os ao número da peça que estava sendo usinada. Em alguns ensaios foram anotados os valores da potência a cada 10 peças produzidas, e em outros a cada 5 peças, até o final da vida da ferramenta.

A princípio os testes seriam realizados com pelo menos o dobro do valor de avanço utilizado atualmente na produção (517mm/min). Entretanto, devido a problemas relacionados principalmente às vibrações, apresentados por algumas ferramentas, foi utilizada nestas o maior valor de avanço possível, sem a ocorrência de vibrações.

Visando facilitar o entendimento dos resultados das curvas de potência, a análise foi dividida nas seguintes partes: Potência x Avanço e Potência x Geometria de Ferramenta.

4.3.1 Potência x Avanço

Esta análise é realizada sobre os resultados das curvas de potência levantadas com os ensaios das ferramentas A e B quando as mesmas foram submetidas aos avanços lineares de 1150 e 1270mm/min. As curvas e as condições de corte são mostradas na **Figura 4.3**.

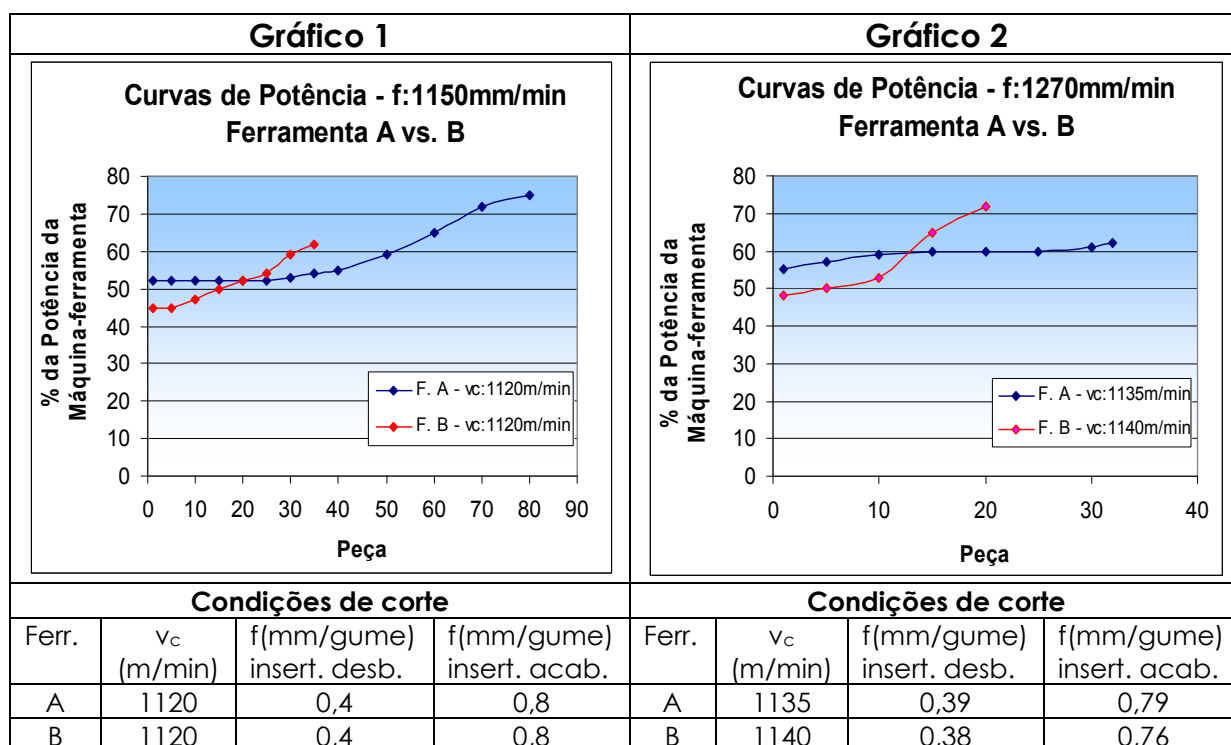


Figura 4.3 - Curvas de potência das ferramentas A e B

A análise em questão é relacionar a potência indicada pela máquina-ferramenta com a força de corte. A força de corte F_c , conforme visto no item **2.4.2 Forças de Usinagem**, é função da largura de usinagem (b), espessura de corte (h) e das propriedades mecânicas do material.

Conforme mencionando no item **2.4.3**, a potência de usinagem é o resultado das somas do produto das componentes de força de usinagem com suas respectivas velocidades. A potência fornecida pela máquina-ferramenta poderia ser expressa como função da potência de usinagem associada às perdas mecânicas e ao rendimento da própria máquina-ferramenta.

Nos resultados mostrados nos gráficos da **Figura 4.3**, é possível verificar a validade dessa relação direta entre o aumento da força de corte, dado pelo aumento do avanço, e o aumento da potência fornecida pela máquina-ferramenta. A relação direta que existe entre a espessura do cavaco e a força de avanço faz com que à medida que aumenta o avanço, a força aumenta significativamente [18, 19, 34, 41, 50]. Nos gráficos, tanto a ferramenta A quanto a B, com o aumento do avanço de 1150mm/min para 1270mm/min, constata-se o aumento da potência

fornecida pela máquina-ferramenta. Assim, tanto na condição de início quanto na de final de vida da ferramenta, tomando como o final de vida o mesmo número de peças produzidas pela condição de maior avanço (curvas vermelhas), tem-se maior valor de potência ao se utilizar maior avanço, como esperado.

4.3.2 Potência de Usinagem x Geometria

Pela análise dos gráficos de potência das ferramentas A e B (**Figura 4.3**), as quais foram submetidas praticamente aos mesmos parâmetros de corte, é possível fazer algumas considerações em relação às variações de potência e às diferenças nas geometrias das ferramentas.

Para esta análise não foi possível verificar a influência dos revestimentos sobre os valores apresentados, pois os fabricantes das ferramentas não forneceram as informações referentes aos revestimentos por uma questão de estratégia competitiva.

Na comparação das curvas de potência entre a ferramenta A e B, nas duas condições de corte, pode-se verificar que no início de vida os valores de potência resultantes da ferramenta B são inferiores. A partir, aproximadamente, da 15ª peça usinada os valores da curva de potência da ferramenta B supera os da A.

As ferramentas, apesar de possuírem aproximadamente as mesmas características geométricas (vide **itens 3.3.1 e 3.3.2**), apresentam como principais diferenças o raio de quina do inserto de desbaste, que na ferramenta A é chanfrado, e o ângulo de direção do gume principal do inserto de desbaste (**Figura 4.4**).

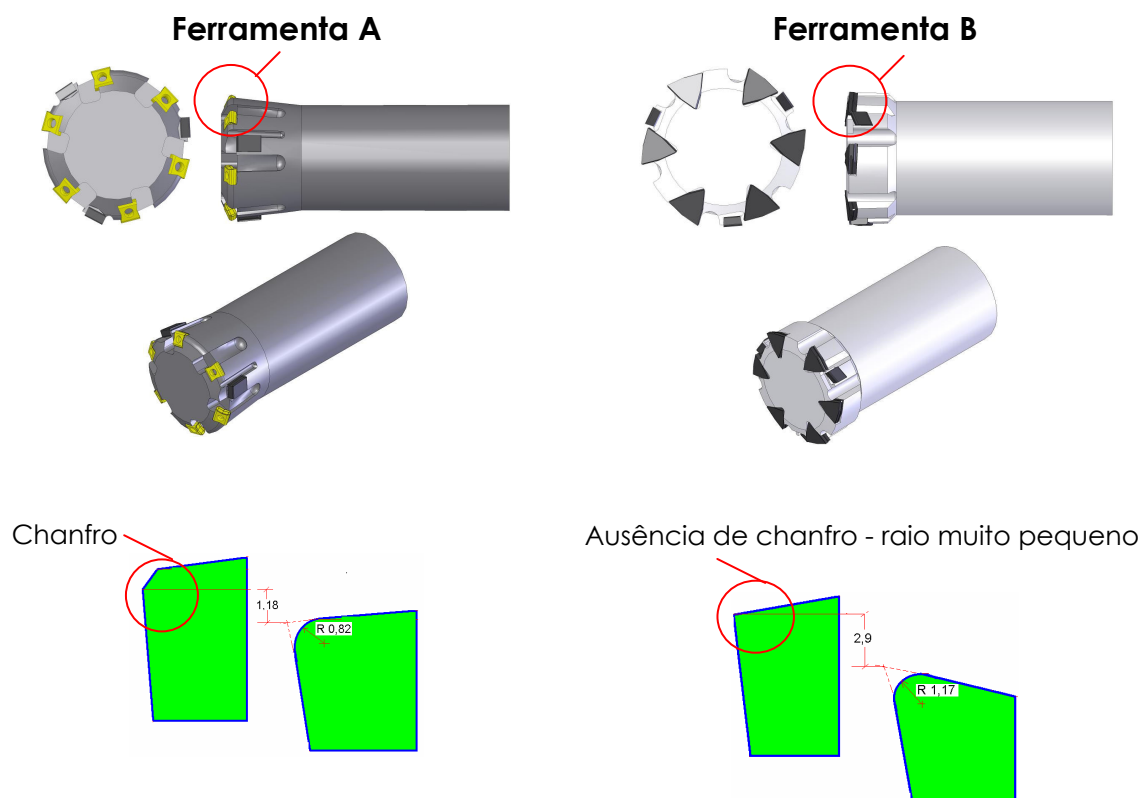


Figura 4.4 – Comparação do raio de quina entre os inserts da ferramenta A e da ferramenta B

Durante a execução dos ensaios, verificou-se a rápida remoção do revestimento do inserto da ferramenta B, na região do flanco e da quina do inserto de desbaste. Por este fato, presume-se que a quina do inserto, sem a presença de um chanfro ou um raio maior, poderia estar sendo sobre-solicitada, perdendo rapidamente a camada de revestimento. O revestimento, além de promover o aumento da resistência ao desgaste do inserto, também reduz o atrito entre a interface cavaco/ferramenta e peça/ferramenta [18, 19, 34, 50]. O rápido crescimento dos valores de potência, durante o ensaio com a ferramenta B, é função da rápida remoção do revestimento, proporcionando o aumento das forças de atrito na região de corte, e assim aumento da força de usinagem. Rahman [51] realizou estudos de torneamento com ferramentas revestidas e não-revestidas, e verificou que com todas as ferramentas revestidas utilizadas nos ensaios, foram obtidos menor força de usinagem e o aumento de vida das ferramentas para as mesmas condições de corte.

Com as demais ferramentas não foi possível fazer análises de geometria vs. potência, já que os parâmetros de corte utilizados pelas demais não foram os mesmos.

4.4 Análise dos Desvios Geométricos

A análise dos resultados dos desvios geométricos tem como finalidade avaliar e entender as diferenças existentes entre as ferramentas ensaiadas, buscando correlacionar os resultados às condições de usinagem, às vidas e às concepções das ferramentas.

4.4.1 Considerações

Para facilitar a compreensão de alguns comportamentos verificados na análise dos desvios geométricos a seguir, são apresentadas para cada condição de usinagem a vida atingida e o critério de fim de vida de cada ferramenta ensaiada e as fotos dos insertos na condição de fim de vida.

a) Ferramenta A

As condições de corte que a ferramenta foi submetida e os resultados de vida são mostrados na **Tabela 4.1**.

Tabela 4.1 - Ensaios realizados com a ferramenta A

Parâmetros		Condição 1	Condição 2
f (mm/min)		1150	1270
f (mm/gume)	Inserto desbaste	0,4	0,39
	inserto acabam.	0,8	0,78
v_c (m/min)		120	135
Vida (quantidade de peças usinadas)		80	32

Para a condição 1 o critério de fim de vida foi o elevado grau de desgaste da ferramenta, apesar de a última peça usinada ainda estar dentro das especificações exigidas.

Para a condição 2 o critério de fim de vida foi o aparecimento de riscos na superfície usinada dos cilindros de aproximadamente 0,1mm.

As fotos dos insertos utilizados pela ferramenta são mostrados na **Figura 4.5**.

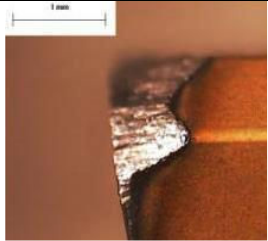
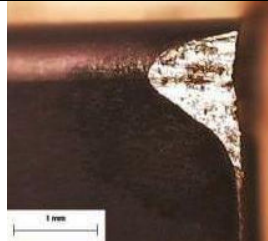


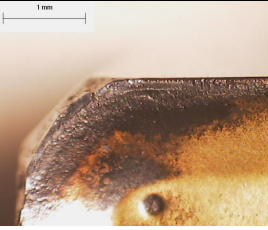
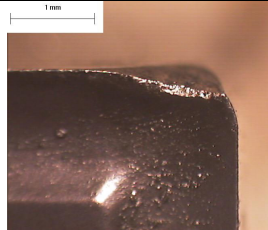
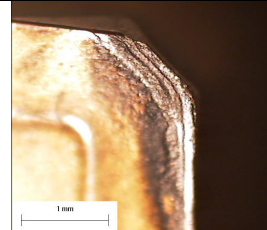
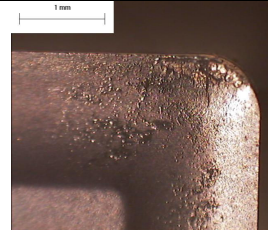
Condição de usinagem 1		Condição de usinagem 2	
$v_c: 120\text{m/min}$		$v_c: 135\text{m/min}$	
Desbaste $f: 0,4\text{mm/gume}$	Acabamento $f: 0,8\text{mm/gume}$	Desbaste $f: 0,39\text{mm/gume}$	Acabamento $f: 0,79\text{mm/gume}$
			
Flanco		Flanco	
			
Face		Face	

Figura 4.5 – Fotos dos insertos da ferramenta A

Em todos os insertos são observados desgastes excessivos além da camada de revestimento. Para uma ferramenta revestida o benefício do revestimento só é garantido enquanto no flanco da ferramenta existir contato entre a superfície de corte e o revestimento. A partir do momento que a superfície de corte entra em contato com o substrato o desgaste é fortemente progressivo. O mesmo vale para a face da ferramenta.

São constatados que os insertos de desbaste sofreram maior desgaste na face que os insertos de acabamento. Apesar do avanço por gume dos insertos de desbaste ser metade do avanço por gume utilizado pelos insertos de acabamento, a profundidade de corte no inserto de desbaste é aproximadamente 13 vezes maior que a profundidade de corte do de acabamento (a espessura de sobremetal removida pelo inserto de desbaste foi de aproximadamente 3,25mm no raio, e a removida pelo insertos de acabamento foi de +/- 0,25mm no raio). Através destas observações, pode-se constatar que a maior profundidade de corte causa maior desgaste do insertos que o maior avanço.

b) Ferramenta B

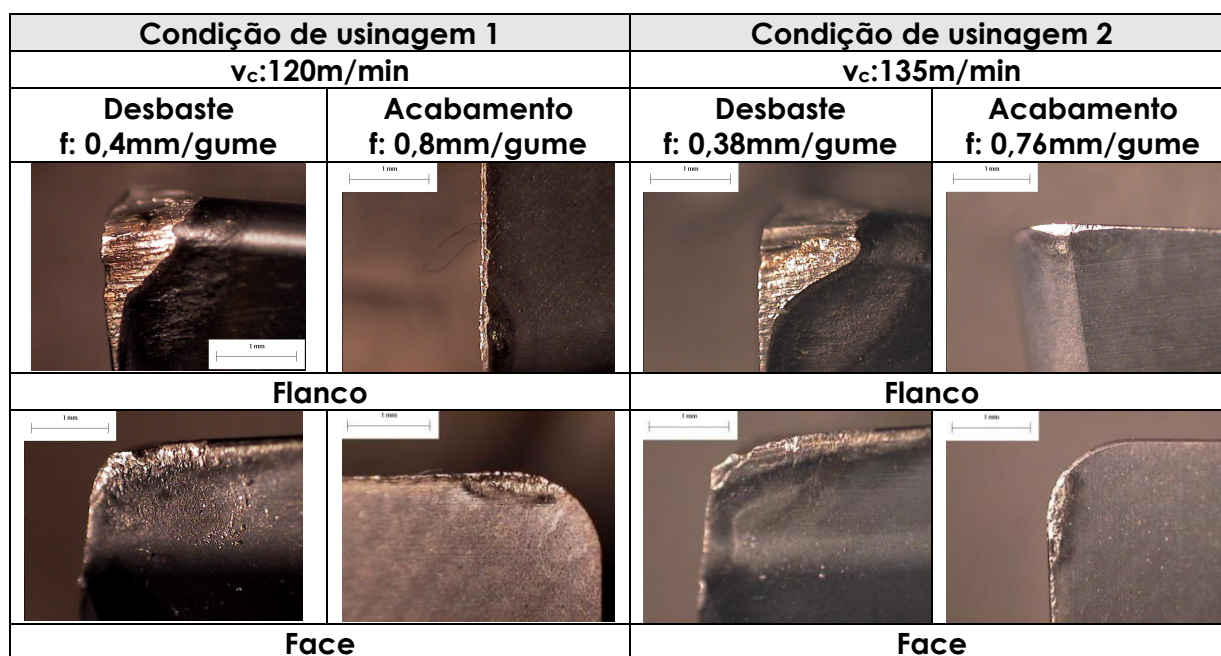
As condições de corte que a ferramenta foi submetida e os resultados de vida são mostrados na **Tabela 4.2**.

Tabela 4.2 – Ensaios realizados com a ferramenta B

Parâmetros		Condição 1	Condição 2
f (mm/min)		1150	1270
f (mm/gume)	inserto desbaste	0,4	0,38
	inserto acabam.	0,8	0,76
v_c (m/min)		120	140
Vida (quantidade de peças usinadas)		34	20

Para as condições 1 e 2 o critério de fim de vida foi o aparecimento de riscos de aproximadamente 0,1mm na parede dos cilindros.

As fotos dos insertos utilizados pela ferramenta são mostrados na **Figura 4.6**.

**Figura 4.6** – Fotos dos insertos da ferramenta B

Nas fotos da **Figura 4.6** são observados que os insertos de desbaste sofreram maior desgaste - tanto na face quanto no flanco - que os de acabamento. Assim como na ferramenta A, o avanço por gume dos insertos de desbaste é a metade do avanço por gume utilizado pelos insertos de acabamento. Deste modo, pode-se concluir que a maior profundidade de corte gera maior desgaste do inserto que na condição de maior avanço. Para esta ferramenta o sobremetal removido pelos insertos de desbaste foi de aproximadamente 3,3mm no raio e o sobremetal removido pelos insertos de acabamento foi de aproximadamente 0,20mm no raio.

De um modo geral, quando são comparadas as marcas de desgaste de flanco dos insertos da ferramenta A com os da ferramenta B, pode-se dizer que ambas apresentaram tamanhos semelhantes, mesmo apresentando valores de vida diferentes.

c) Ferramenta C

As condições de corte que a ferramenta foi submetida e os resultados de vida são mostrados na **Tabela 4.3**

Tabela 4.3 – Ensaio realizado com a ferramenta C

Parâmetros	Condição
f (mm/min)	517
f (mm/gume)	0,19
v_c (m/min)	135
Vida (quantidade de peças usinadas)	135

O critério de fim de vida atingido pela ferramenta foi devido ao desgaste excessivo do inserto.

As fotos dos insertos utilizados pela ferramenta são mostrados na **Figura 4.7**.

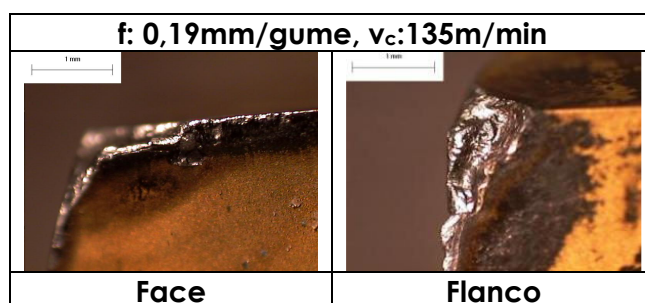


Figura 4.7 – Fotos dos insertos da ferramenta C

Conforme observado nas fotos da **Figura 4.7**, constata-se que tanto o desgaste da face quanto o de flanco foram excessivos. Entretanto, a ferramenta, mesmo neste estado, ainda estava em condições de usinar peças dentro das tolerâncias dimensional e de forma especificadas.

d) Ferramenta D

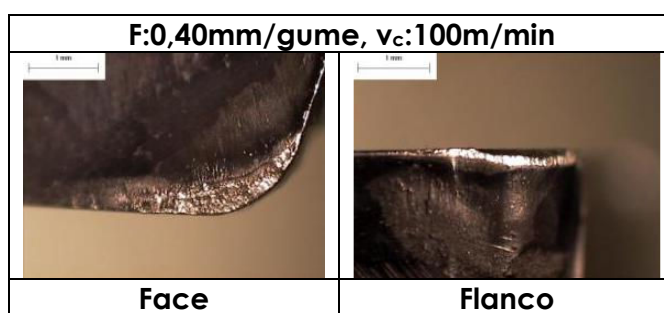
As condições de corte às quais a ferramenta foi submetida e os resultados de vida são mostrados na **Tabela 4.4**

Tabela 4.4 – Ensaio realizado com a ferramenta D

Parâmetros	Condição
f (mm/min)	640
f (mm/gume)	0,4
v_c (m/min)	100
Vida (quantidade de peças usinadas)	70

O critério de fim de vida atingido pela ferramenta foi a presença de rebarbas na saída do cilindro.

As fotos dos insertos utilizados pela ferramenta são mostrados na **Figura 4.8**.

**Figura 4.8** – Fotos dos insertos da ferramenta D

Na **Figura 4.8** observa-se um desgaste pequeno na camada de revestimento do inserto. O avanço por gume desta ferramenta foi o mesmo avanço por gume utilizado pelas ferramentas A e B na condição de corte 1.

Analizando qualitativamente, apesar das diferenças encontradas entre as ferramentas em relação à vida (ferramenta A 10 blocos a mais e a ferramenta B 36 peças a menos que a ferramenta D), à velocidade de corte (as ferramentas A e B foram submetidas a uma velocidade 20% maior em relação à ferramenta D), e à maior profundidade de corte que os insertos da ferramenta D foram submetidos (não possui insertos escalonados), os insertos da ferramenta D apresentaram as menores marcas de desgaste.

Apesar deste resultado, não se pode concluir se é o revestimento ou a geometria que tiveram mais influência sobre o que foi constatado, pois conforme mencionado anteriormente, os fornecedores das ferramentas não forneceram as informações referentes ao revestimento.

4.4.2 Análise dos Resultados de Circularidade

Os resultados apresentados nos gráficos a seguir correspondem às médias dos valores obtidos nas medições dos cilindros. As análises de circularidade são realizadas pelas avaliações dos comportamentos das ferramentas nas seguintes situações: análise de resultados nas condições de início e fim de vida da ferramenta (IV x FV), análise dos resultados para diferentes valores de avanço, análise dos resultados para diferentes velocidades de corte, e análise do desempenho das ferramentas na condição de mesma produtividade.

a) Análise dos resultados nas condições de início e fim de vida da ferramenta

No gráfico 1 (**Figura 4.9**) são mostrados os valores de início e fim de vida correspondentes às ferramentas A e B. As condições de corte utilizadas nestas ferramentas foram avanço de 1150mm/min e velocidade de corte de 120m/min.

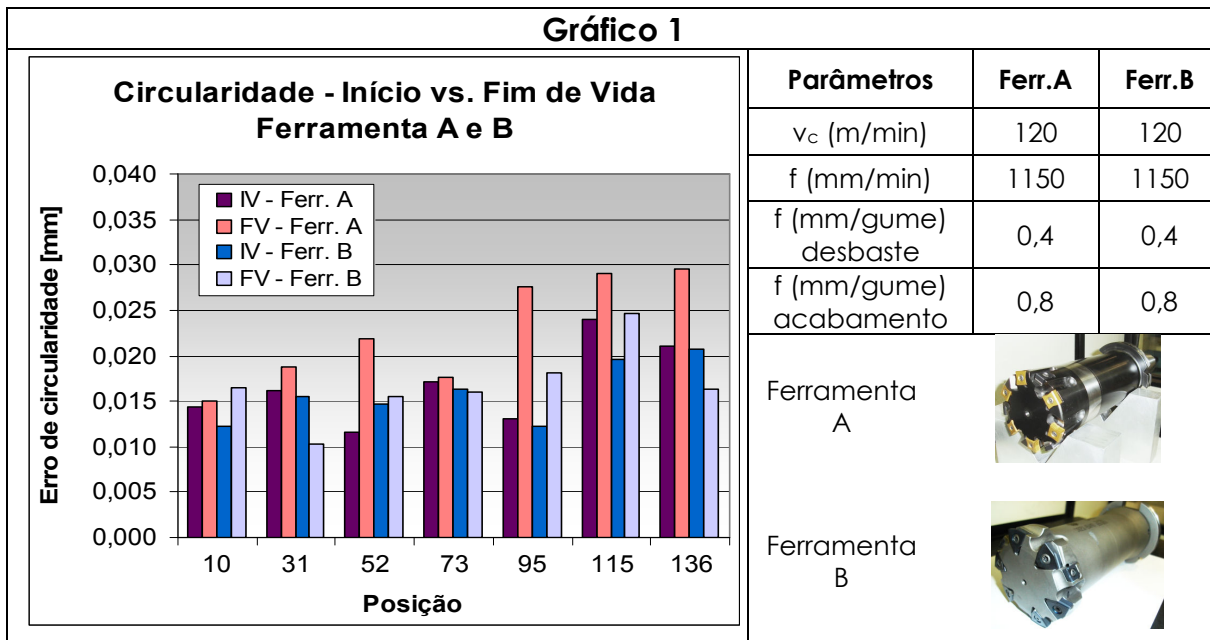


Figura 4.9 – Valores de circularidade obtidos pelas ferramentas A e B nas condições de início e fim de vida

No gráfico 2 (**Figura 4.10**) estão mostrados os valores de início e fim de vida correspondentes às ferramentas C e D. Na ferramenta C foi utilizado avanço de 517mm/min e velocidade de corte de 135m/min. Na ferramenta D foi utilizado avanço de 640mm/min e velocidade de corte de 100m/min.

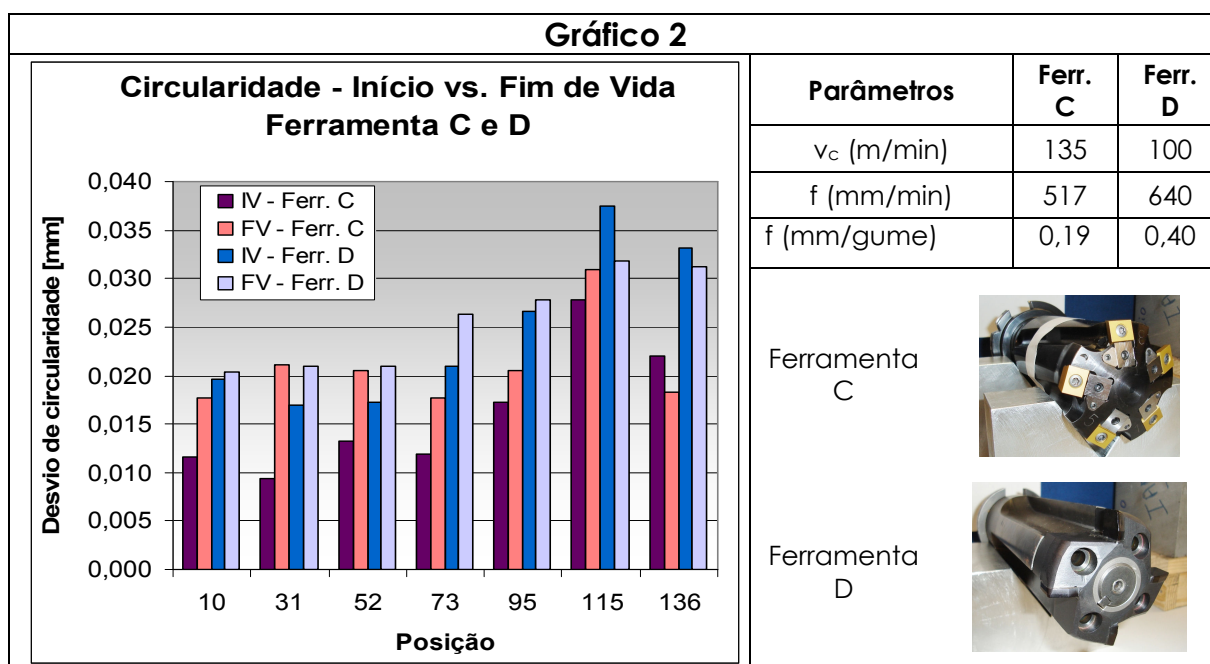


Figura 4.10 – Valores de circularidade obtidos pelas ferramentas C e D nas condições de início e fim de vida

Pela análise dos gráficos 1 e 2, independente dos parâmetros de corte utilizados pelas ferramentas, verificam-se em quase todas as posições dos cilindros maiores valores dos desvios de circularidade na condição de fim de vida da ferramenta. O estado de uma ferramenta exerce notável influência sobre os esforços de usinagem, podendo chegar a valores 25% maiores para um desgaste da ferramenta dentro da faixa admissível de desgaste. Isto resulta no aumento das forças de atrito, devido ao cegamento do gume da ferramenta e, por consequência, na elevação da temperatura e da força de usinagem. O aumento dos esforços causa aumentos nas deformações elásticas no sistema levando a distorções maiores da circularidade [18, 19, 34, 50].

b) Análise dos resultados para diferentes valores do avanço

Com os ensaios realizados com as ferramentas A e B, utilizando-se avanços de 517mm/min e 1150mm/min (**Figura 4.11**), e D para avanços de 517mm/min e 640mm/min (**Figura 4.12**), foi possível analisar a influência da variação do avanço sobre o desvio de circularidade dos cilindros. Os resultados referem-se às condições de início e final de vida da ferramenta para as duas condições de avanço.

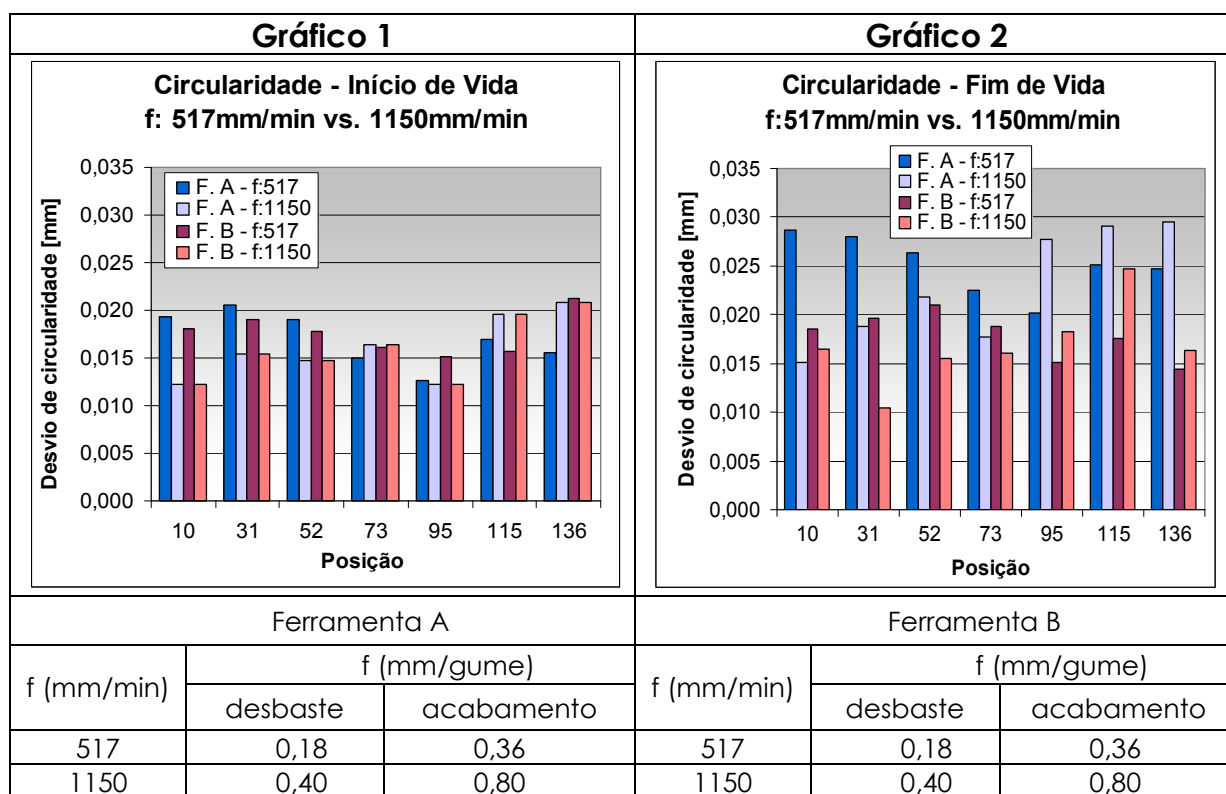


Figura 4.11 – Resultados de circularidade em função da variação do avanço

Conforme observado nos gráficos da **Figura 4.11**, o maior avanço é aproximadamente 120% maior que o menor avanço, e não é possível verificar tendências de maiores ou menores valores de circularidade nas condições de menor ou maior avanço. Pode-se verificar uma tendência de maiores valores de circularidade para a condição de menor avanço até a posição 73 aproximadamente (meio do cilindro). A partir desta posição a situação se inverte e, assim, verifica-se o aumento dos valores de circularidade para a condição de maior avanço.

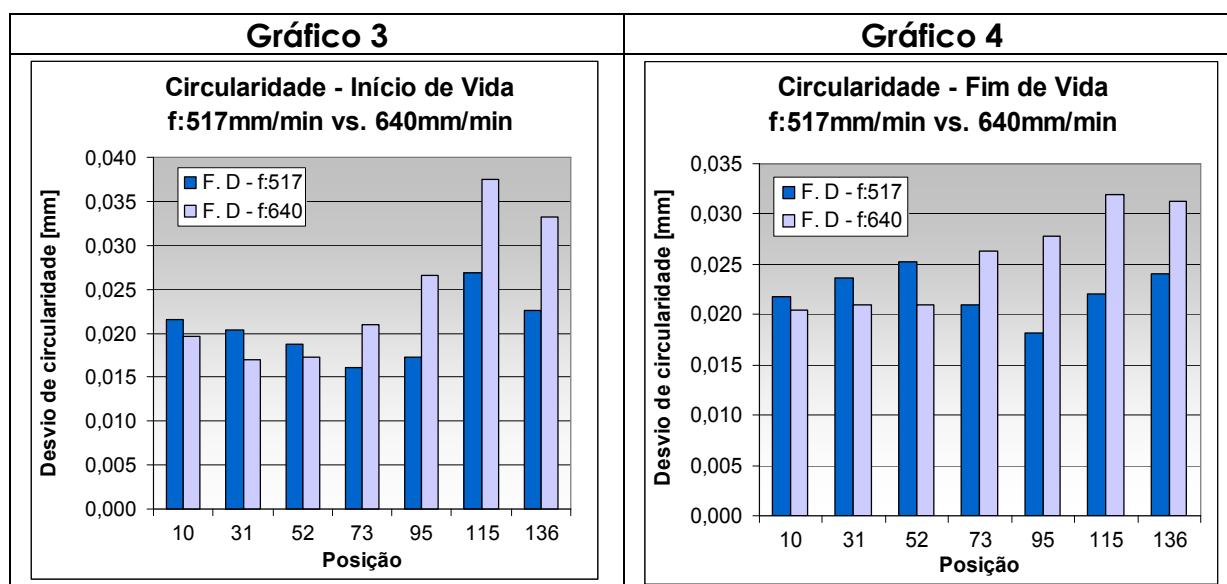


Figura 4.12 – Comportamento da circularidade com a variação do avanço na ferramenta D

Observando o gráfico de circularidade (**Figura 4.12**), dos ensaios feitos com a ferramenta D (f:517mm/min igual a 0,32mm/gume e f: 640mm/min igual a 0,4mm/gume) onde houve uma variação de aproximadamente 23% no valor do avanço, os resultados de circularidade em função do avanço também seguem a mesma tendência dos gráficos 1 e 2.

Bezerra [52], em estudos de alargamento em alumínio, encontrou variação nos resultados de circularidade com o aumento do avanço, entretanto, não verificou nenhuma tendência nos resultados. Tomando o processo de furação como uma analogia ao mandrilamento, os resultados apresentados nos gráficos 1, 2 e 3 vão em desencontro aos resultados obtidos por Castillo [53]. Em seu trabalho de furação profunda, Castillo verificou a ocorrência do aumento dos valores de circularidade com o aumento do avanço.

Provavelmente a explicação para tais resultados não esteja correlacionada à concepção das ferramentas, pois existem significativas diferenças entre as ferramentas A/D e B/D, e nem à magnitude da variação do valor do avanço, pois são diferentes as variações do avanço na D e A/B. Esse comportamento pode estar relacionado à rigidez do bloco ao longo do cilindro, devido à diferente distribuição de massa no comprimento do mesmo, ou à fixação do bloco no dispositivo. A diferença de rigidez pode

favorecer a obtenção de melhores resultados de circularidade nas condições de início e fim de vida da ferramenta.

Na análise de circularidade em função da variação do avanço não foi possível verificar o comportamento da ferramenta C, já que os ensaios com avanços superiores ao de 517mm/min (avanço adotado como padrão) não se mostraram factíveis. Foi observada uma intensa vibração na ferramenta ao submetê-la a avanços superiores a 600mm/min. Uma das hipóteses para explicar o surgimento de tais vibrações é a ausência de elementos de guia na ferramenta. As ferramentas A e B, as quais possuem gumes secundários atuando como elementos de guia, não apresentaram qualquer problema de vibração. Esta é a principal diferença construtiva observada nas ferramentas A e B em relação à ferramenta C. Insertos escalonados proporcionam maior estabilidade à ferramenta [22, 46].

A ferramenta D, assim como a A e a B, também não apresentou problema de vibração. Contudo o avanço ficou limitado pelo reduzido número de insertos (4), em comparação às demais. O valor limite de avanço utilizado foi de 640mm/min, sem qualquer problema de vibração.

c) Análise dos resultados para diferentes velocidades de corte

Os gráficos 1 e 2 da **Figura 4.13** correspondem respectivamente às condições de início e fim de vida das ferramentas A e B. Ambas as ferramentas foram submetidas ao avanço de 517mm/min. Na ferramenta A foram utilizadas velocidades de corte de 120m/min e 135m/min, e na ferramenta B 120m/min e 140m/min. As curvas correspondentes a estas velocidades estão indicadas nas legendas dos gráficos.

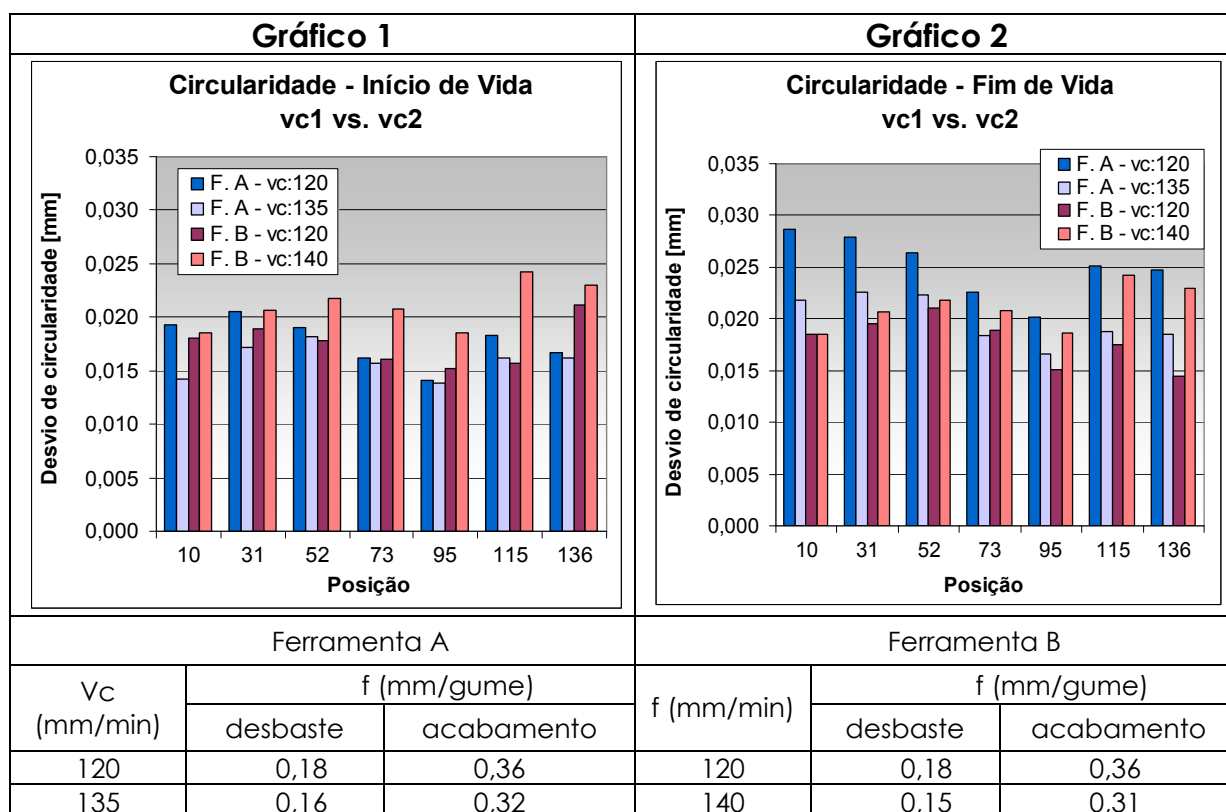


Figura 4.13 – Comportamento da circularidade em função da velocidade de corte

Conforme mostrado nos gráficos 1 e 2, os resultados correspondentes à ferramenta B apresentam valores maiores de circularidade na condição de maior velocidade de corte (v_c :140m/min), tanto na situação de início de vida (gráfico 1) quanto na de fim de vida (gráfico 2).

Já os resultados provenientes dos ensaios com a ferramenta A apresentam maiores valores de circularidade na condição de menor velocidade de corte (v_c :120m/min) nas situações de início e fim de vida.

Eckhardt [54] concluiu, em seus ensaios comparativos de alargadores de gume único sob diferentes condições de corte, que a velocidade de corte praticamente não influencia na circularidade dos cilindros.

Castillo [53] não obteve, no seu trabalho de furação profunda, uma tendência em relação à circularidade com a variação da velocidade de corte.

Provavelmente as variações dos valores de circularidade obtida com diferentes velocidades de corte estejam relacionadas às diferenças construtivas entre as ferramentas, já que para a ferramenta B foi verificada a tendência de piores valores de circularidade para a condição de maior

velocidade de corte, e para a ferramenta A na condição de fim de vida foram obtidos piores valores de circularidade para a menor velocidade de corte.

Nas ferramentas C e D não foram realizadas variações da velocidade de corte durante os ensaios. Assim, esta análise limitou-se apenas às ferramentas A e B.

d) Análise do desempenho das ferramentas na condição de mesma produtividade

Através desta análise é possível verificar a influência das diferenças nas concepções das ferramentas testadas sobre os resultados de circularidade dos cilindros.

A **Figura 4.14** e a **Figura 4.15** referem-se às condições de início e fim de vida da ferramenta. As ferramentas foram submetidas ao avanço de 517mm/min. As ferramentas A e B foram testadas nas velocidades de corte de 120m/min, e as ferramentas C e D nas velocidades de corte de 135m/min e 100m/min, respectivamente.

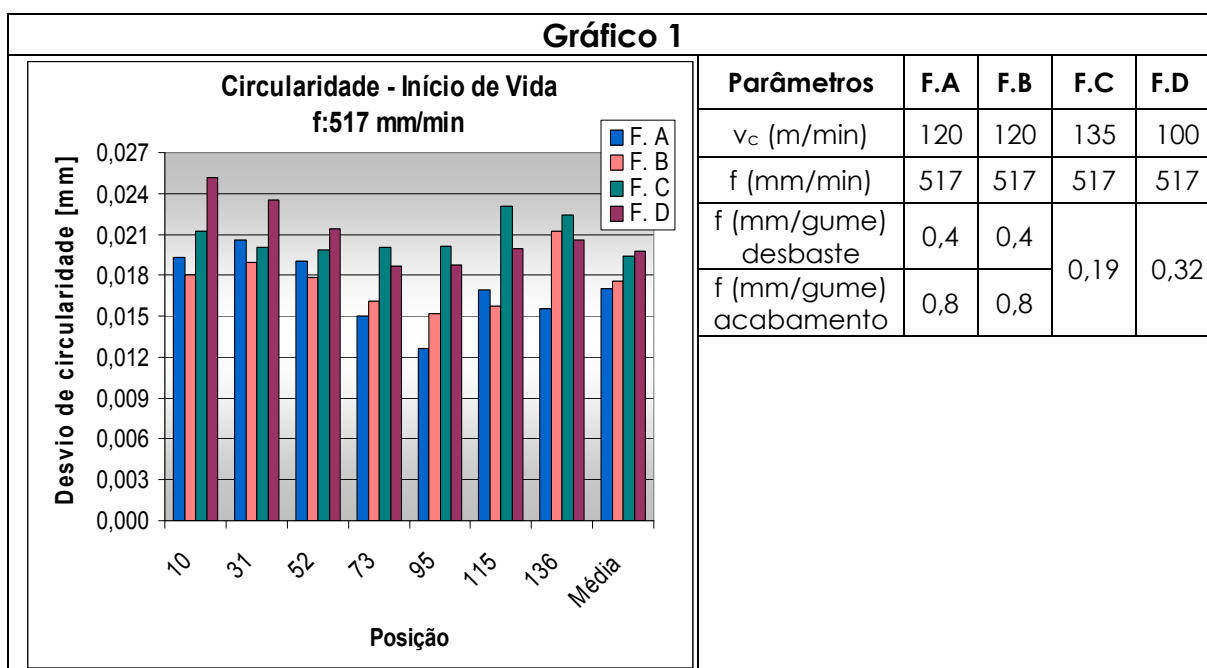


Figura 4.14 – Valores de circularidade na condição de início de vida

Pela análise do gráfico 1, observa-se que os valores de circularidade são semelhantes ao longo de cada posição do cilindro. Verificam-se valores de circularidade superiores para a ferramenta C e D em relação aos valores

obtidos com a ferramenta A e B. Os valores médios de circularidade para as ferramentas A e B foram de aproximadamente 0,017mm. Para as ferramentas C e D os valores médios foram de aproximadamente 0,019mm. Verifica-se que com as ferramentas C e D ocorreram erros de circularidade aproximadamente 12% superiores aos comparados com os erros verificados com as ferramentas A e B.

A maior média dos valores encontrados nas curvas das ferramentas C e D pode estar relacionada à ausência de insertos escalonados nestas ferramentas, os quais são encontrados nas ferramentas A e B. Conforme visto no item **2.10.2a4**, o recuo axial existente entre os insertos de desbaste e acabamento, o que caracteriza ferramentas com insertos escalonados, proporciona maior estabilidade à ferramenta. Este tipo de concepção favorece a obtenção de melhores resultados de circularidade e de retitude, podendo ser esta a explicação para os melhores resultados de circularidade observados no gráfico 1 [22, 46].

A ferramenta com 4 insertos (ferramenta D), por melhor que seja regulada no *presseting*, não apresentará os quatro gumes em condições de corte iguais. Haverá uma tendência de desequilíbrio no início de sua utilização. Com o desgaste mais acentuado dos gumes mais solicitados, a ferramenta deverá tender para uma posição de equilíbrio, passando os quatro gumes a girar sobre a mesma circunferência.

Com a ferramenta de 5 gumes (ferramenta C) este desequilíbrio também ocorre, só que de maneira mais complexa, pois não se pode antever quais dos 5 gumes (3 gumes) iniciam a operação.

As ferramentas A e B possuem 3 insertos destinados ao acabamento do cilindro. Ferramentas com 3 insertos sempre terão os três insertos em contato com a parede do cilindro, proporcionando melhores resultados de circularidade já no início da vida da ferramenta.

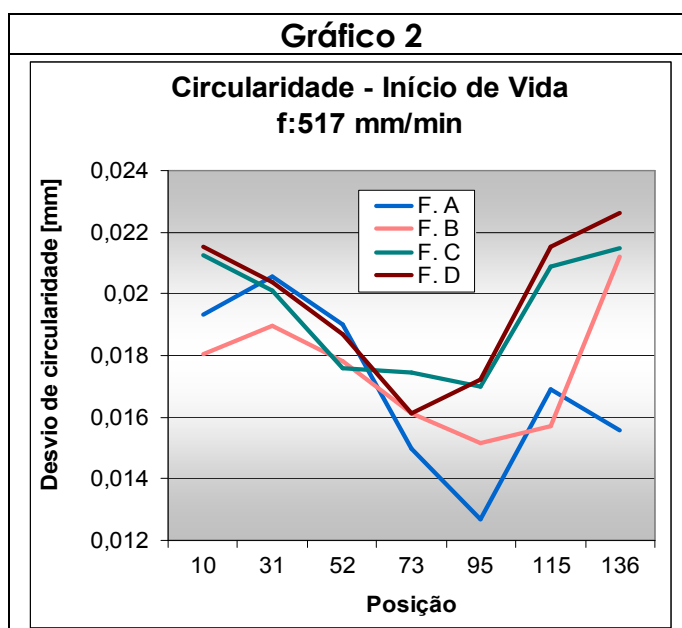


Figura 4.15 – Tendência dos valores de circularidade na condição de início de vida da ferramenta

No gráfico 2 (**Figura 4.15**) são mostradas as curvas de tendência dos resultados. Observa-se nestas curvas a mesma tendência de comportamento ao longo do cilindro. Tal comportamento pode estar relacionado à variação de rigidez ao longo do comprimento do cilindro e distorções elásticas devido às solicitações impostas pelo dispositivo de fixação do bloco.

Na **Figura 4.16** é mostrado o resultado do desvio de circularidade na condição de fim de vida da ferramenta. Como as ferramentas atingiram o fim de vida sob critérios diferentes, torna-se possível fazer apenas uma análise qualitativa sobre as tendências dos resultados.

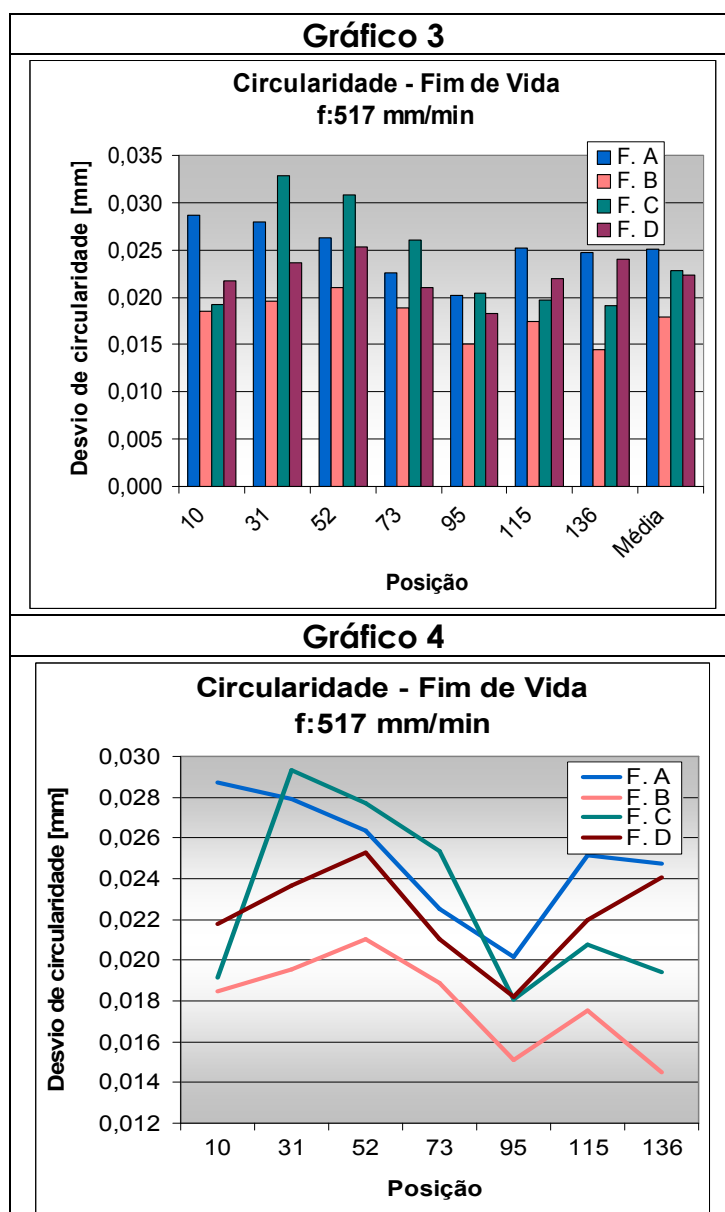


Figura 4.16 – Valores de circularidade na condição de fim de vida das ferramentas

Observando-se que com a ferramenta A foi atingida uma vida de 80 peças, com a B 34, com a C 135 e com a D 70, pode-se inferir que, pelo fato de a ferramenta B ter atingido sua vida com um número de peças usinadas bem inferior que em relação às demais, o desgaste geral dela tenha sido menor que o das demais e, com isso, os menores valores de circularidade na condição de fim de vida desta ferramenta (vide fotos no **item 4.4.1**). Vários autores já comprovaram que a evolução do desgaste de flanco ocasiona o aumento da força de avanço e do momento torçor e pode provocar, portanto, distorções na peça usinada [18, 55, 56].

No gráfico 4 (**Figura 4.16**) são mostradas as curvas de tendência das ferramentas. Verifica-se nestas curvas a mesma tendência da variação dos valores ao longo do cilindro, apesar das ferramentas terem atingido diferentes critérios para finalizar os ensaios. Tal comportamento difere dos resultados obtidos por Castillo [53] ao analisar a variação da circularidade de furos obtidos com brocas de diferentes geometrias e condições de corte. Na condição de fim de vida da ferramenta, Castillo [53] encontrou que as tendências dos resultados diferem visivelmente entre as geometrias. Segundo o autor, tal comportamento pode ser explicado pela dificuldade encontrada para finalização de cada ensaio, no mesmo nível de desgaste das ferramentas.

Pode-se afirmar que o desvio de circularidade sofre influência das variações das concepções das ferramentas ensaiadas, para as condições de corte apresentadas no mandrilamento de desbaste. Contudo a evolução dos valores de circularidade está mais associada ao desgaste da ferramenta do que à concepção da mesma, para os tipos de ferramentas analisados.

4.4.3 Análise dos Resultados de Retitude

Na análise dos resultados de retitude os valores mostrados nos gráficos a seguir correspondem às médias obtidas na medição dos cilindros. Assim, como na análise de circularidade, nesta os dados estão agrupados de forma a analisar as situações: análise dos resultados nas condições de início e fim de vida da ferramenta, análise dos resultados em função da variação do avanço, análise dos resultados para diferentes velocidades de corte e análise do desempenho das ferramentas na condição de mesma produtividade.

a) Análise dos resultados nas condições de início e fim de vida da ferramenta

Para verificar a existência de variações nos valores de retitude nas condições de início e fim de vida da ferramenta (**Figura 4.17**), são mostrados no gráfico 1 os valores de retitude obtidos com as ferramentas A e B. Estas ferramentas foram submetidas ao avanço de 1150mm/min e à velocidade

de corte de 120m/min. No gráfico 2 são apresentados os resultados correspondentes às ferramentas C (f :517mm/min e v_c :135m/min) e D (f :640m/min e v_c :100m/min).

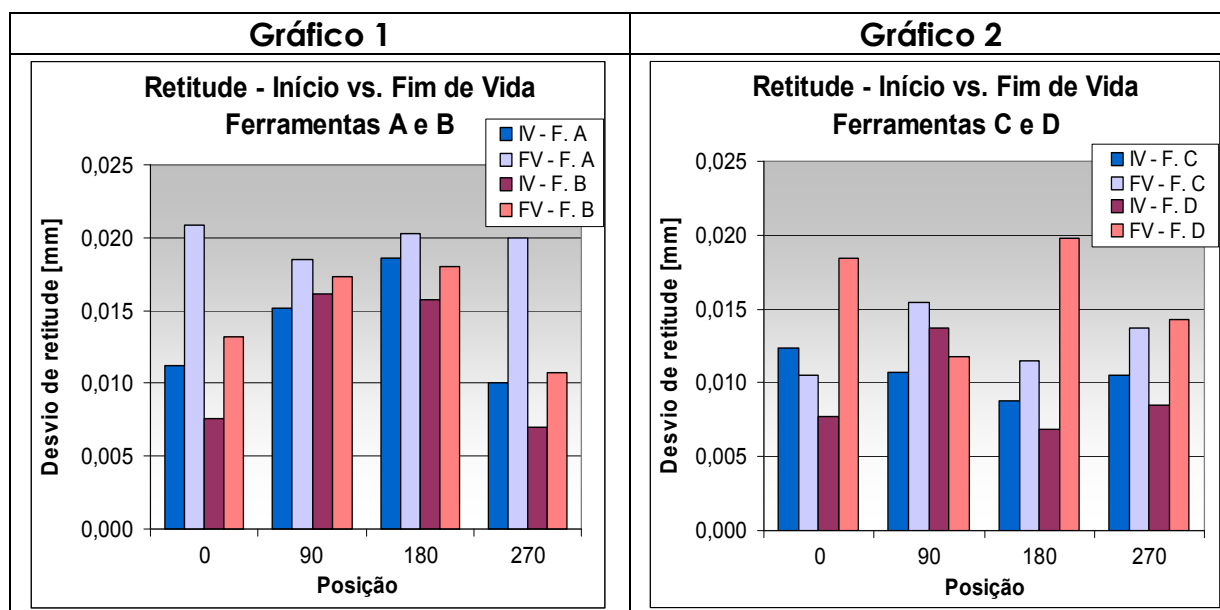


Figura 4.17 – Valores de retitude de início e fim de vida da ferramenta

Observa-se nos gráficos 1 e 2 que na média todas as ferramentas apresentam piores resultados de retitude na condição de fim de vida, conforme expectativa inicial. O desgaste sofrido pelo inserto resulta no aumento da superfície de contato na região de corte. Isto provoca as elevações da temperatura na ferramenta e das forças de usinagem, com conseqüente piora da qualidade de forma e dimensional da peça [18, 19, 35].

Os valores de retitude das ferramentas A (gráfico 1) e D (gráfico 2) são os que apresentaram as maiores diferenças entre a condição de início e fim de vida.

Os insertos da ferramenta D apresentam um pequeno ângulo de direção do gume secundário e um comprimento relativamente grande desse gume. Esta característica faz com que o gume secundário atue como elemento de guia na ferramenta (**Figura 4.18**).

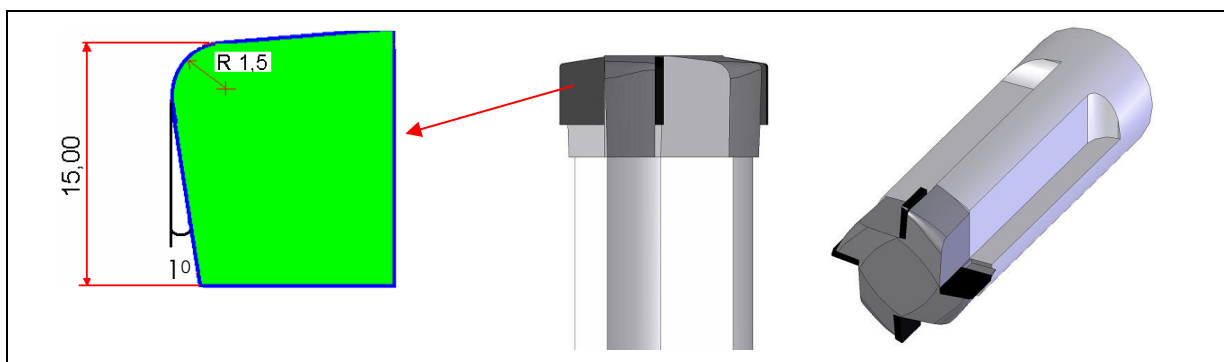


Figura 4.18 – Características do gume secundário da ferramenta D que o fazem atuar como elemento de guia

Possivelmente à medida que aumenta o desgaste do gume secundário, exista a tendência de aumentar a atuação deste gume como elemento de guia, já que o desgaste resulta em gumes secundários mais paralelos à parede do furo. Assim, quanto mais desgastado estiver o gume secundário maior é a tendência de este atuar como elemento de guia (**Figura 4.19**).

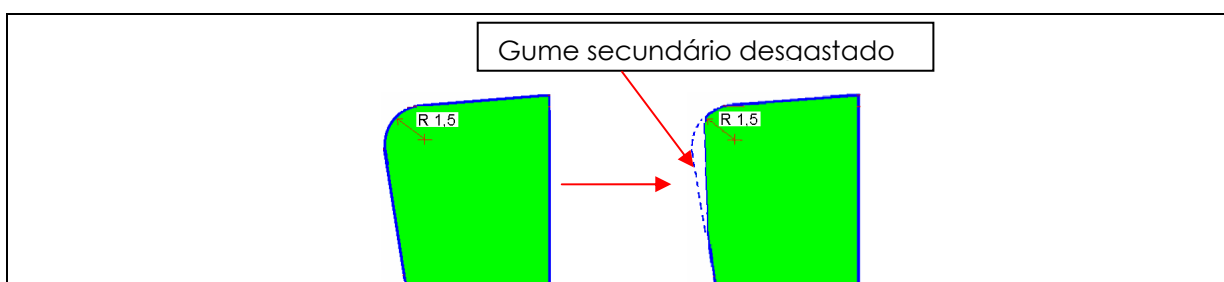


Figura 4.19 – Desgaste do gume secundário que leva à maior atuação do mesmo como elemento de guia

A ferramenta A apresenta a disposição escalonada dos insertos, com insertos de acabamento com pequeno ângulo do gume secundário (vide **Figura 3.3**). Provavelmente os desgastes sofridos pelos insertos de desbaste e acabamento também contribuem para acentuar os efeitos dos elementos de guia.

Conforme visto no **item 2.10.2a.1**, elementos de guia dificultam a correção de desvios de retitude. O aumento do efeito do elemento de guia devido ao desgaste dos insertos pode ser um dos fatores que provocam o aumento dos valores de retitude resultantes das ferramentas na condição de fim de vida.

Na ferramenta C, onde a geometria dos insertos praticamente não fornece condições para que atuem como elementos de guia, à medida que

aumenta o desgaste da ferramenta não ocorre um aumento considerável do efeito do elemento de guia. Esta pode ser a provável causa das pequenas diferenças encontradas nos valores de retitude entre as condições de início e fim de vida desta ferramenta.

Com a ferramenta B foi possível usinar uma quantidade de peças bastante reduzida em relação às demais, apesar de esta ferramenta possuir grandes semelhanças construtivas em relação à ferramenta A. Possivelmente o pequeno número de peças produzidas pela ferramenta B tenha sido um dos principais fatores que produziram a pequena diferença entre os valores de retitude nas condições de início e fim de vida.

b) Análise dos resultados para diferentes valores de avanço

Para verificar a influência da variação do avanço no desvio de retitude dos cilindros, são apresentados os resultados da variação do avanço de 517 para 1150 mm/min nas condições de início de vida (gráfico 1) e fim de vida da ferramenta (gráfico 2) das ferramentas A e B (**Figura 4.20**). No gráfico 3 (**Figura 4.21**) são mostrados os resultados de início e fim de vida da ferramenta D com a variação do avanço de 517 para 640 mm/min.

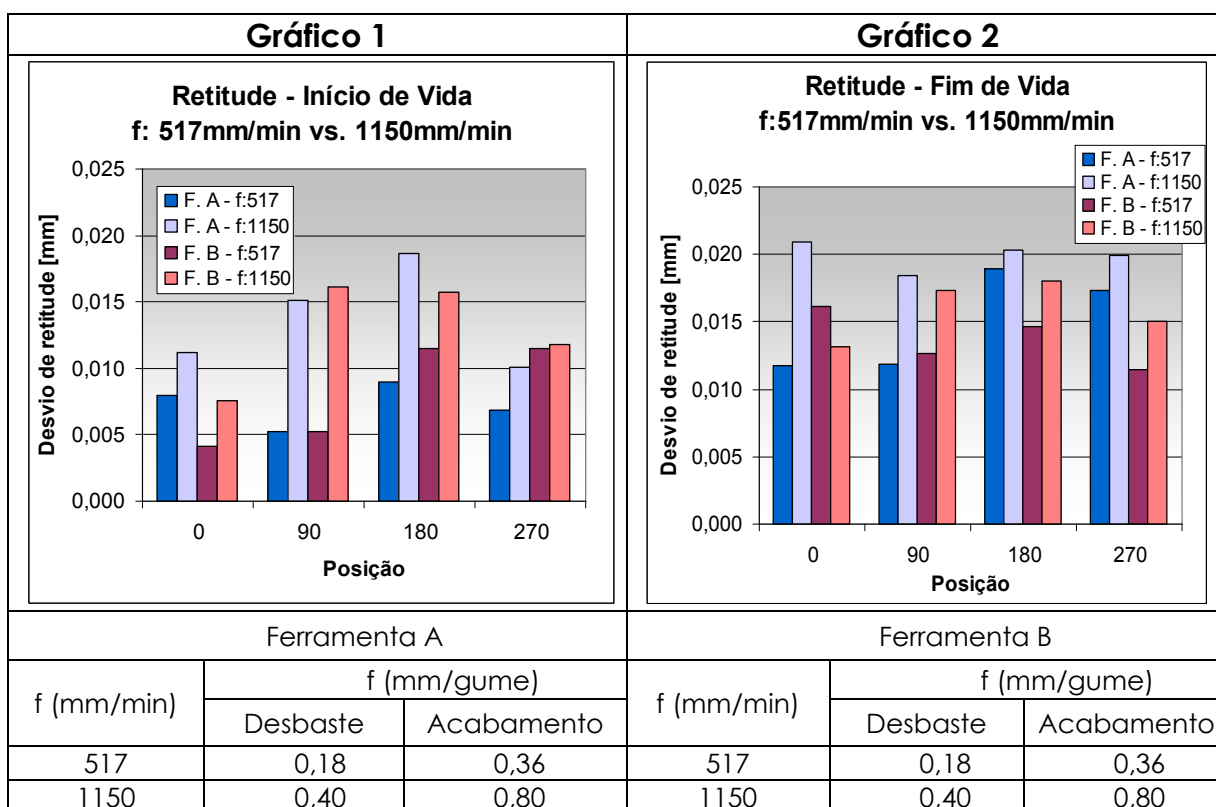


Figura 4.20 – Resultados de retitude em função da variação do avanço

Verifica-se nos gráficos 1 e 2 que o aumento do avanço resulta no aumento dos valores de retitude. Possivelmente a relação direta que existe entre a espessura do cavaco e a força de avanço faz com que à medida em que aumenta o avanço, a força aumente significativamente [18, 19, 34, 41, 50].

A diferença nos valores de retitude ocasionada pelo aumento do avanço é maior na condição de início de vida (gráfico 1), onde os valores de retitude duplicam em algumas posições. Na condição de fim de vida, a diferença entre os resultados, devido ao aumento do avanço, já não é tão acentuada.

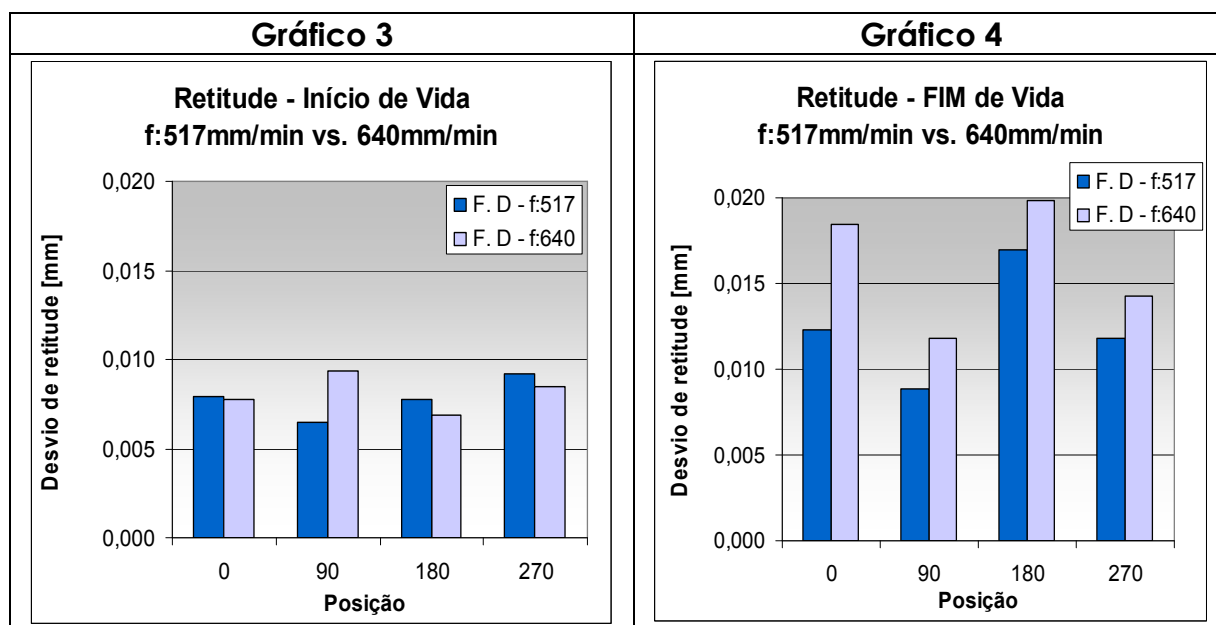


Figura 4.21 – Variação dos valores de retitude em função do avanço

Observando os gráficos 3 e 4 (**Figura 4.21**), verifica-se que o comportamento da ferramenta D (f: 517mm/min igual a 0,32mm/gume e f: 640mm/min igual a 0,4mm/gume) segue o mesmo comportamento observado nas ferramentas A e B apenas na condição de fim de vida (gráfico 4). Na condição de início de vida não se pode afirmar a existência de diferenças significativas dos valores de retitude na condição de maior avanço sobre a de menor e vice-versa. Já na condição de fim de vida, verificam-se maiores valores de retitude em todas as posições do cilindro.

O comportamento verificado na ferramenta D pode ser função da pequena diferença dos valores de avanços que a ferramenta foi testada. É

possível que na condição de início de vida o pequeno desgaste sofrido pelo gume não ocasione grandes variações de forças provocadas pelo avanço de 517mm/min e 640mm/min [18, 19, 20]. À medida que aumenta o desgaste da ferramenta, a diferença entre as forças de usinagem nas duas condições de avanço pode aumentar. Isso gera elevação das distorções e das dilatações térmicas, podendo produzir peças com maiores valores de retitude.

c) Análise dos resultados para diferentes velocidades de corte

Nos gráficos da **Figura 4.22** são mostrados os resultados de retitude das ferramentas A e B. O gráfico 1 corresponde à condição de início de vida e o gráfico 2 à condição de fim de vida. As ferramentas foram testadas com o mesmo valor de avanço de 517mm/min, porém com a ferramenta A foram utilizadas velocidades de corte de 120 e 135m/min, e com a ferramenta B velocidades de 120 e 140m/min.

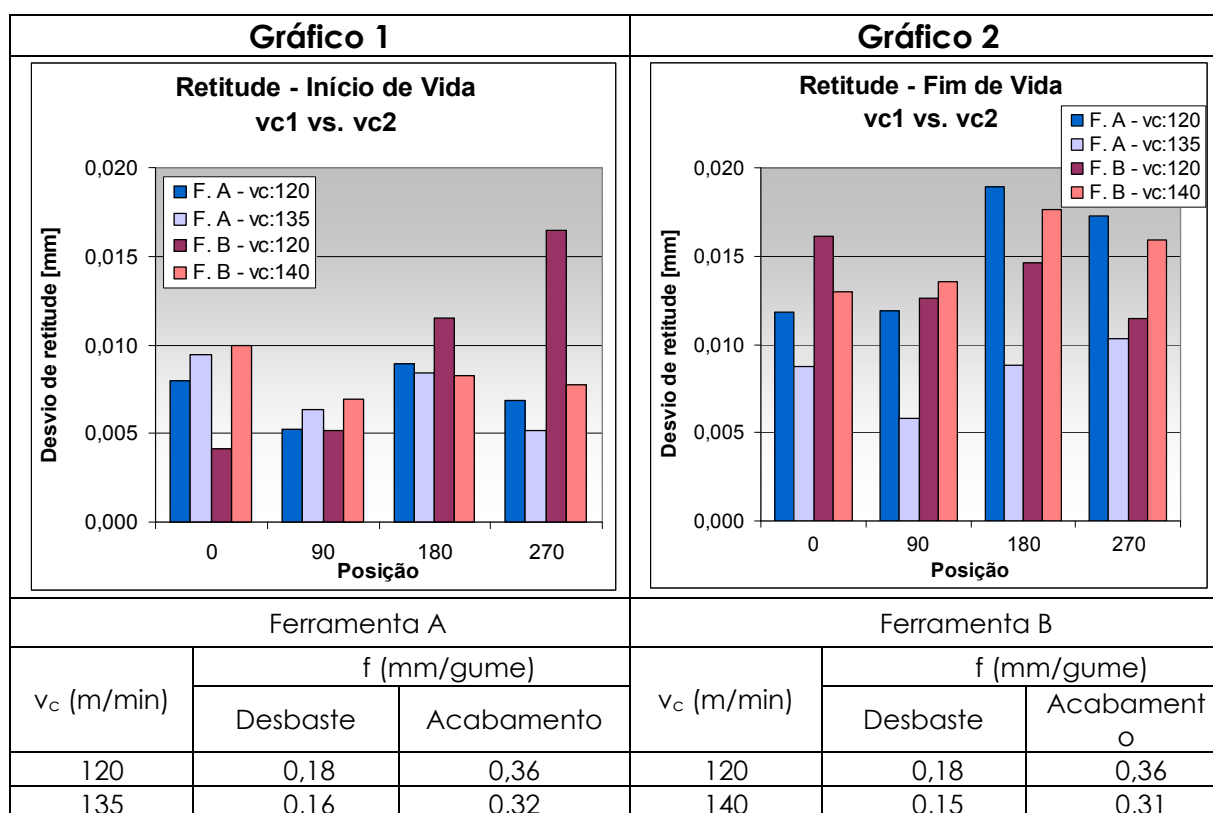


Figura 4.22 – Resultados de retitude em função da variação da velocidade de corte

Na condição de início de vida (gráfico 1) não existe uma tendência clara dos valores de retitude, já que dependendo da posição de medição

do cilindro, ora os valores de retitude são maiores ora são menores com o aumento da velocidade. Na condição de fim de vida (gráfico 2), verificam-se maiores valores de retitude na situação de menor velocidade de corte ($v_c:120\text{m/min}$) da ferramenta A. Para a ferramenta B a situação se inverte. Com esta os maiores valores de retitude são verificados na situação de maior velocidade de corte ($v_c:140\text{m/min}$).

Os resultados de retitude na condição de fim de vida seguem a mesma tendência dos resultados de circularidade para diferentes velocidades de corte. Segundo estudos realizados por Castillo [53], no seu trabalho de furação profunda com diferentes brocas, e Eckhardt [54], em seu trabalho de alargadores de gume único, ambos não encontraram conclusões definitivas a respeito da influência a variação da velocidade de corte sobre a qualidade de forma dos cilindros.

Em função destes resultados, verifica-se que não existe uma tendência de comportamento bem definida em relação ao desvio de retitude nas ferramentas de mandrilar ao variar a velocidade de corte. Para uma conclusão definitiva a respeito do comportamento das ferramentas, para diferentes velocidades de corte, torna-se necessária a realização de ensaios complementares.

d) Análise do desempenho das ferramentas na condição de mesma produtividade

Esta análise tem como objetivo verificar a influência das diferenças construtivas entre as ferramentas testadas nos resultados de retitude. Os ensaios foram realizados com avanço de 517mm/min e velocidades de corte de 120m/min nas ferramentas A e B, 135m/min na ferramenta C e 100m/min na D. Os gráficos 1 e 2 referem-se às condições de início de vida da ferramenta (**Figura 4.23**).

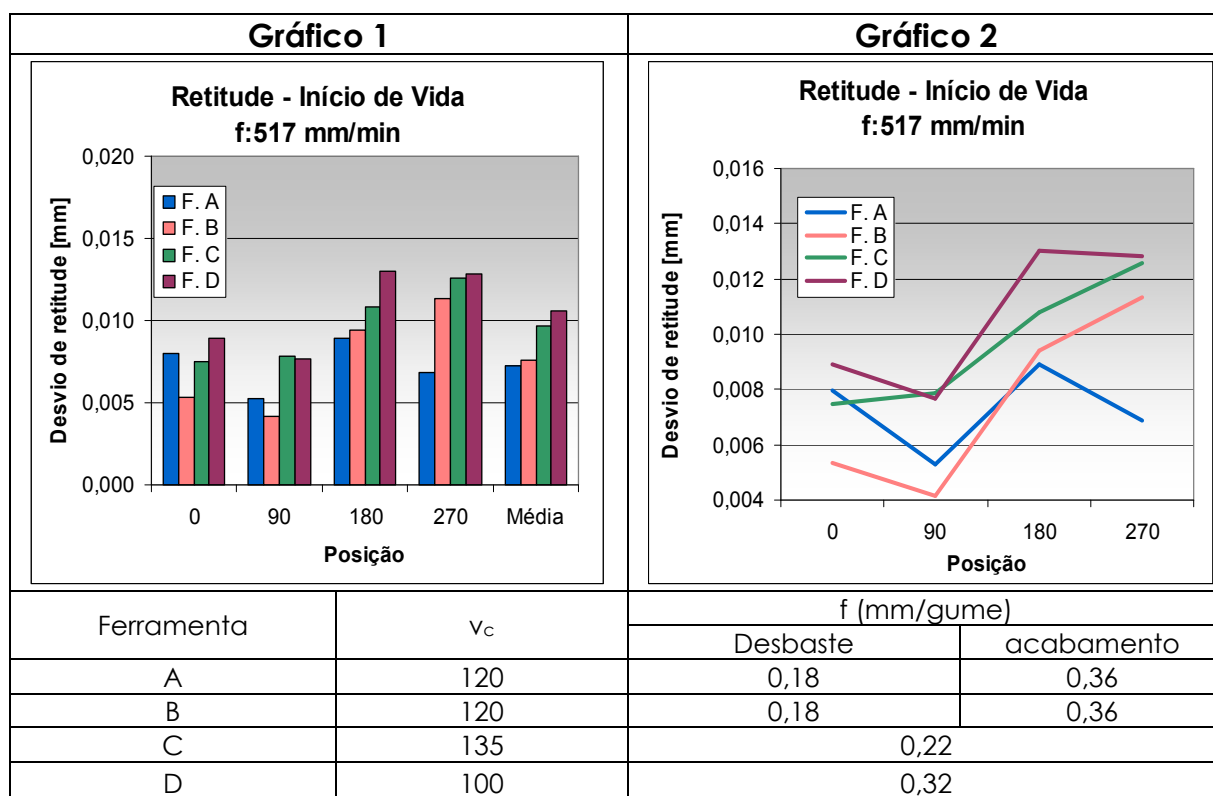


Figura 4.23 – Resultados de retitude das ferramentas testadas na condição de início de vida

Pelas análises dos gráficos 1 e 2, verifica-se a mesma tendência das curvas ao longo das posições de medição para todas as ferramentas e maiores valores de retitude para a ferramenta D e C.

Possivelmente a mesma tendência das curvas esteja associada à variação de rigidez ao longo da circunferência do cilindro e às distorções do mesmo devido às solicitações impostas pelo dispositivo de fixação.

Os maiores valores de retitude obtidos com as ferramentas C e D em comparação com os obtidos com as ferramentas A e B podem estar relacionados às características construtivas das ferramentas. A ferramenta D que apresentou os maiores valores de retitude não possui insertos escalonados e apresenta gume secundário que atua como elemento de guia (vide **tem 3.3.4**). Insertos escalonados proporcionam melhor estabilidade da ferramenta e menores valores de circularidade e retitude [22, 27]. Elementos de guia forçam a ferramenta a seguir a linha de centro do pré-furo impedindo a ferramenta de corrigir desvios de retitude [35, 41, 42, 43, 44]. A diferença construtiva da ferramenta C em relação à D é não apresentar elementos de guia. Possivelmente esta característica influenciou

nos resultados, que tiveram valores um pouco menores que os apresentados com a ferramenta D. Com as ferramentas A e B que apresentam insertos escalonados foram obtidos os melhores resultados.

Em relação à condição de fim de vida (**Figura 4.24**), devido ao fato de as ferramentas terem atingido vidas diferentes e critérios de fim de vida diferentes, torna-se possível fazer apenas uma análise qualitativa.

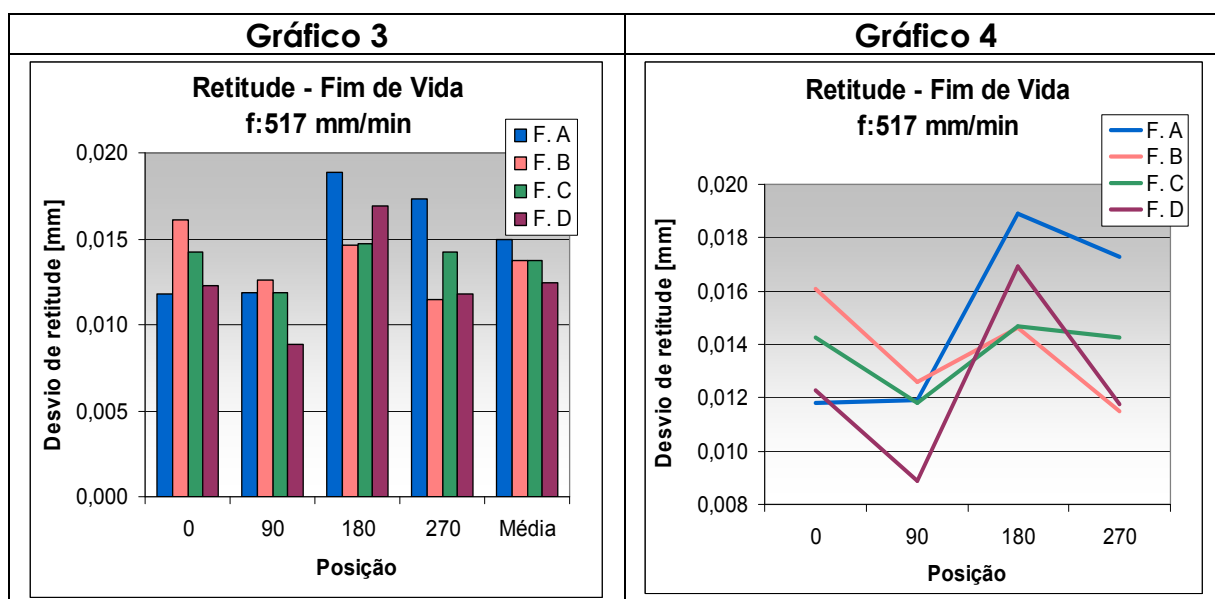


Figura 4.24 – Resultados de retitude das ferramentas testadas na condição de fim de vida

Verifica-se que os resultados de retitude não apresentaram significativas variações entre as ferramentas em cada posição de medição (gráfico 3).

No gráfico 4 observam-se as curvas de tendência. Estas, assim como na condição de início de vida, apresentam comportamentos semelhantes nas posições de medição dos cilindros.

4.4.4 Análise dos Resultados de Cilindricidade

Nos resultados de cilindridade são analisados os resultados nas condições de início e fim de vida da ferramenta, análise dos resultados para diferentes valores de avanço, análise dos resultados para diferentes velocidades de corte e análise do desempenho das ferramentas para a mesma produtividade.

a) Análise dos resultados nas condições de início e fim de vida da ferramenta

No gráfico 1 (**Figura 4.25**) são apresentados os valores de cilindricidade nas condições início e fim de vida correspondentes às ferramentas A e B. Com estas ferramentas foram utilizados avanço de 1150mm/min e velocidade de corte de 120m/min. No gráfico 2 (**Figura 4.25**) são apresentados os valores de cilindricidade nas condições de início e fim de vida correspondentes às ferramentas C e D. Com a ferramenta C foram utilizados avanço de 517mm/min e velocidade de corte de 135m/min. Com a ferramenta D foram utilizados avanço de 640mm/min e velocidade de corte de 100m/min.

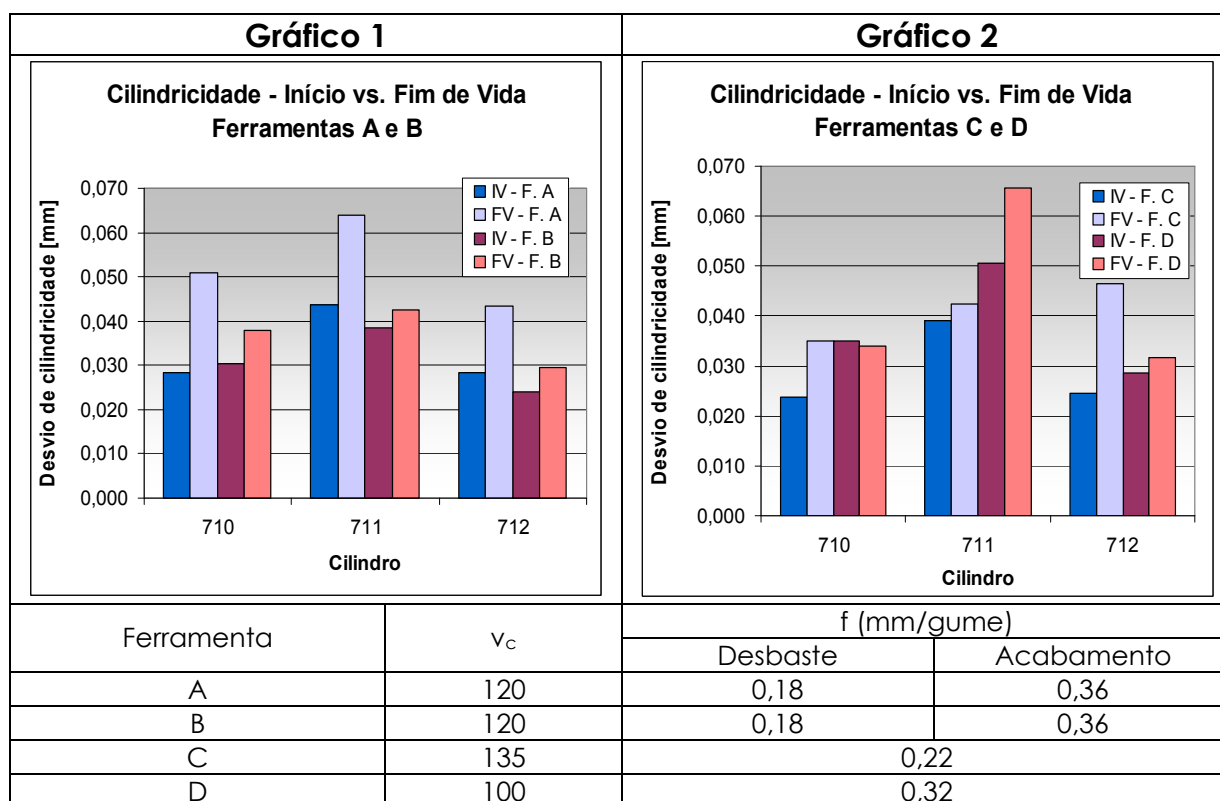


Figura 4.25 – Avaliação da cilindricidade nas condições de início e fim de vida de ferramenta

Nas análises de circularidade e retitude observou-se o aumento dos valores desses desvios geométricos na condição de fim de vida. Na análise de cilindricidade observa-se a mesma tendência de aumento do desvio na condição de fim de vida da ferramenta. Como mencionado anteriormente (**itens 4.4.2a e 4.4.3a**), o desgaste da ferramenta resulta no aumento das forças de atrito e das forças de usinagem. Estas alterações provocam

dilatações térmicas e distorções tanto da peça quanto da ferramenta, reduzindo a qualidade de forma da peça [18, 19, 20, 35].

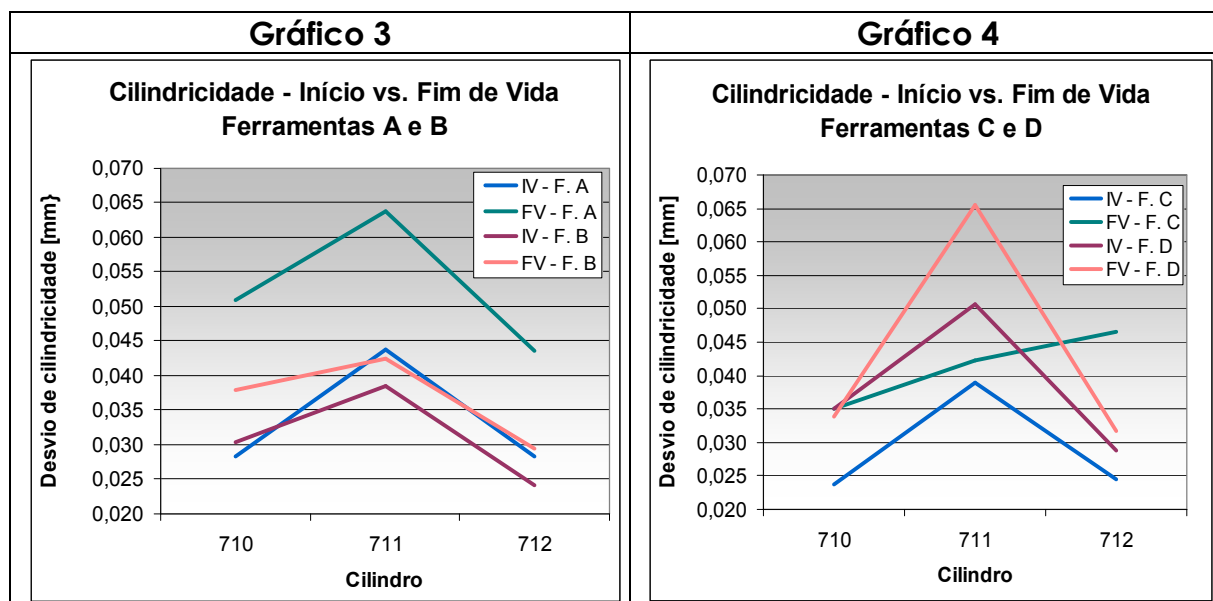


Figura 4.26 – Curvas de tendência dos resultados de cilindridade

Na **Figura 4.26** são mostradas as curvas de tendência dos resultados de cilindridade. Nestas verificam-se maiores valores de cilindridade no cilindro 711, independente da condição de início ou fim de vida da ferramenta. Os maiores valores de cilindridade encontrados neste cilindro podem ser função das diferenças de rigidez existentes entre ele e os demais e das maiores distorções a que este pode estar submetido devido às forças impostas pelo dispositivo de fixação.

b) Análise dos resultados para diferentes valores de avanço

Nas figuras a seguir são mostrados os resultados de cilindridade em função da variação do avanço de 517 para 1150mm/min das ferramentas A e B (**Figura 4.27**) e a variação de 517 para 640mm/min da ferramenta D (**Figura 4.28**).

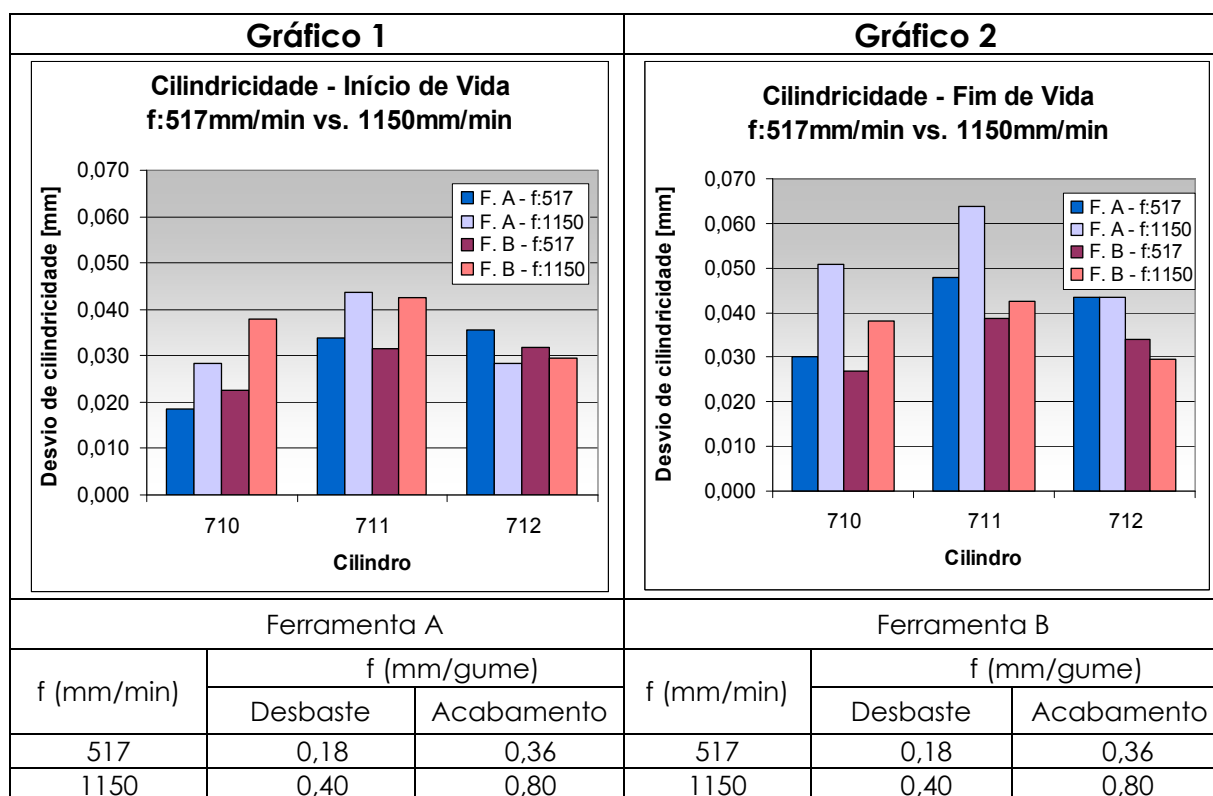


Figura 4.27 – Resultados de cilindridade em função da variação do avanço

Verifica-se nos gráficos 1 (início de vida) e 2 (fim de vida) que na média dos valores obtidos entre os cilindros o aumento do avanço resulta em elevação do desvio de cilindridade (cilindro 712 é exceção). Foi observado na análise de circularidade e retitude, em função da variação do avanço, que os valores de circularidade não sofrem significativas variações, mas a retitude tem seus valores elevados com o aumento do avanço.

No trabalho de análise de cilindridade em furos utilizando alargadores de gume único, realizado por Eckhardt [54], não foram obtidos resultados conclusivos sobre a dependência dos resultados de cilindridade com o variável avanço.

No trabalho de alargamento em alumínio com ferramentas multicortantes desenvolvidos por Bezerra [52], e no trabalho realizado por Santos [57] em alargamento em ferro fundido com alargadores com diferentes geometrias, ambos verificaram o aumento dos valores de cilindridade com o aumento do avanço.

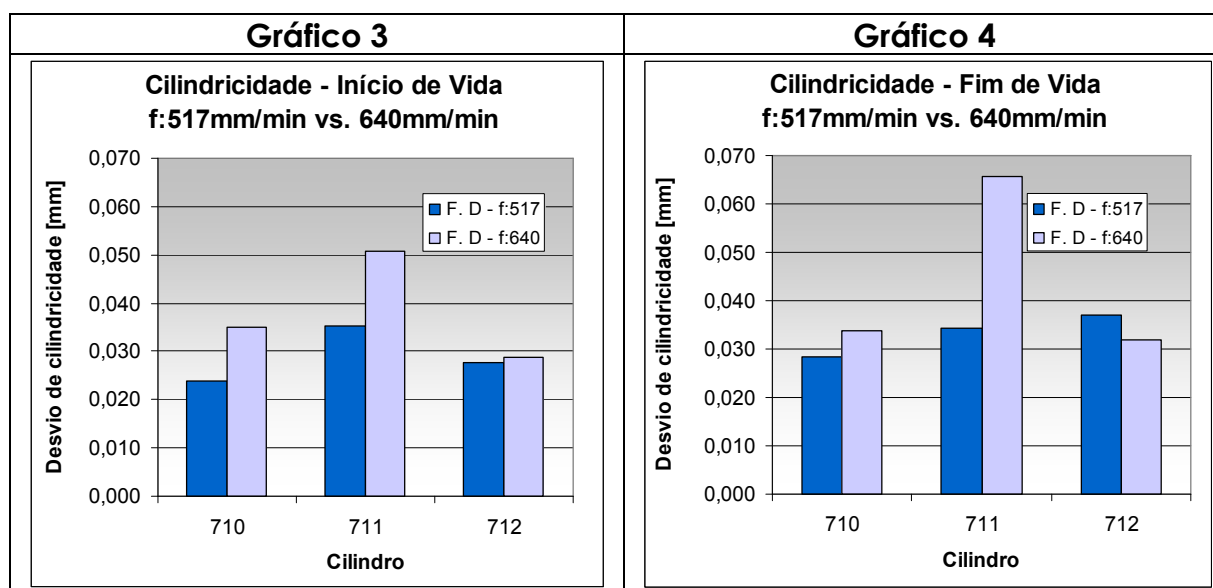


Figura 4.28 – Resultados de cilindridade em função da variação do avanço

Nos gráficos 3 e 4 são apresentados os resultados da ferramenta D (f: 517mm/min igual a 0,32mm/gume e f: 640mm/min igual a 0,4mm/gume), nas condições de início e fim de vida, respectivamente. Constata-se que, sob a condição de maior avanço (640mm/min), os valores de cilindridade são maiores, considerando a média dos valores obtidos, tanto na condição de início de vida quanto na de fim de vida de ferramenta. Conclui-se desta análise, que no mandrilamento pequenas variações no valor do avanço resultam em aumento do desvio de cilindridade dos cilindros.

c) Análise dos resultados para diferentes velocidades de corte

Nos gráficos 1 e 2 da **Figura 4.29** são apresentados os resultados correspondentes aos testes das ferramentas A e B, nas condições de início e fim de vida de ferramenta, respectivamente. As ferramentas foram submetidas ao avanço de 517mm/min, sendo testadas as velocidades de corte de 120 e 135m/min na ferramenta A, e 120 e 140m/min na ferramenta B.

Nos gráficos 1 e 2 os cilindros medidos foram os 610, 611 e 612 (cilindros do banco II). Nestes cilindros foram utilizados o parâmetro de produção (avanço limitado a 517mm/min).

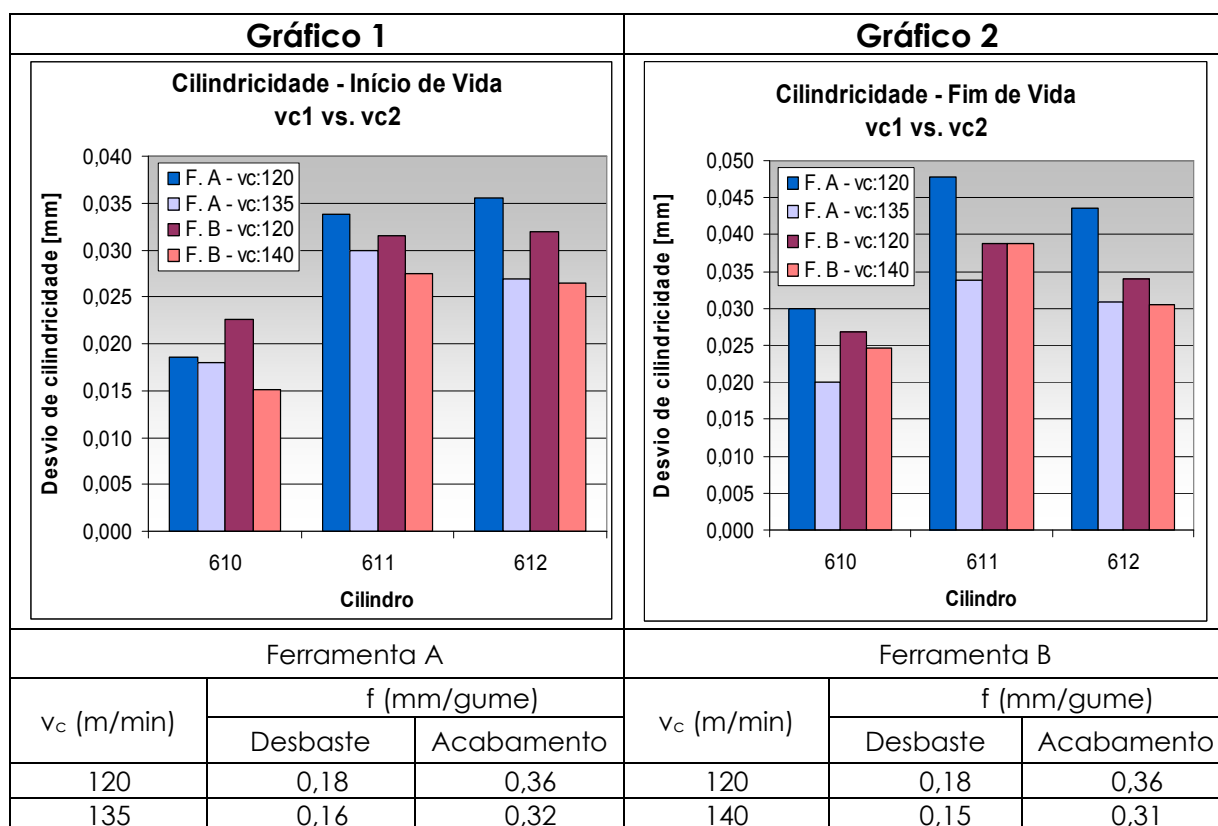


Figura 4.29 – Resultados de cilindridade variando-se a velocidade de corte

Verifica-se nos gráficos 1 (início de vida) e 2 (fim de vida) que o aumento da velocidade de corte reduziu os valores de cilindridade. O aumento da velocidade de corte contribui para o aumento de vibrações, de deformações e desbalanceamento da máquina-ferramenta [19, 34, 58, 59]. Por outro lado, às vezes velocidade de corte maior leva a menores forças, que por sua vez diminuem as solicitações e as deformações. Em analogia ao processo de furação, Kim [60] em seu trabalho de otimização do processo de furação encontrou como resultado o aumento do desvio de cilindridade com o aumento da velocidade de corte.

Nas análises de circularidade e retitude foram observados resultados poucos conclusivos ao se alterar a velocidade de corte, pois dependendo da ferramenta e da condição de corte, ora os valores de circularidade aumentavam ora diminuía.

d) Análise do desempenho das ferramentas na condição de mesma produtividade

Esta análise visa obter informações sobre o desempenho das ferramentas em relação à cilindridade na condição de avanço

517mm/min, ou seja, mesma produtividade. As ferramentas B e C foram testadas nas velocidades de corte de 120m/min, e a C e D nas velocidades de 135m/min e 100m/min, respectivamente. Os gráficos 1 e 2 referem-se às condições de início de vida da ferramenta (**Figura 4.30**).

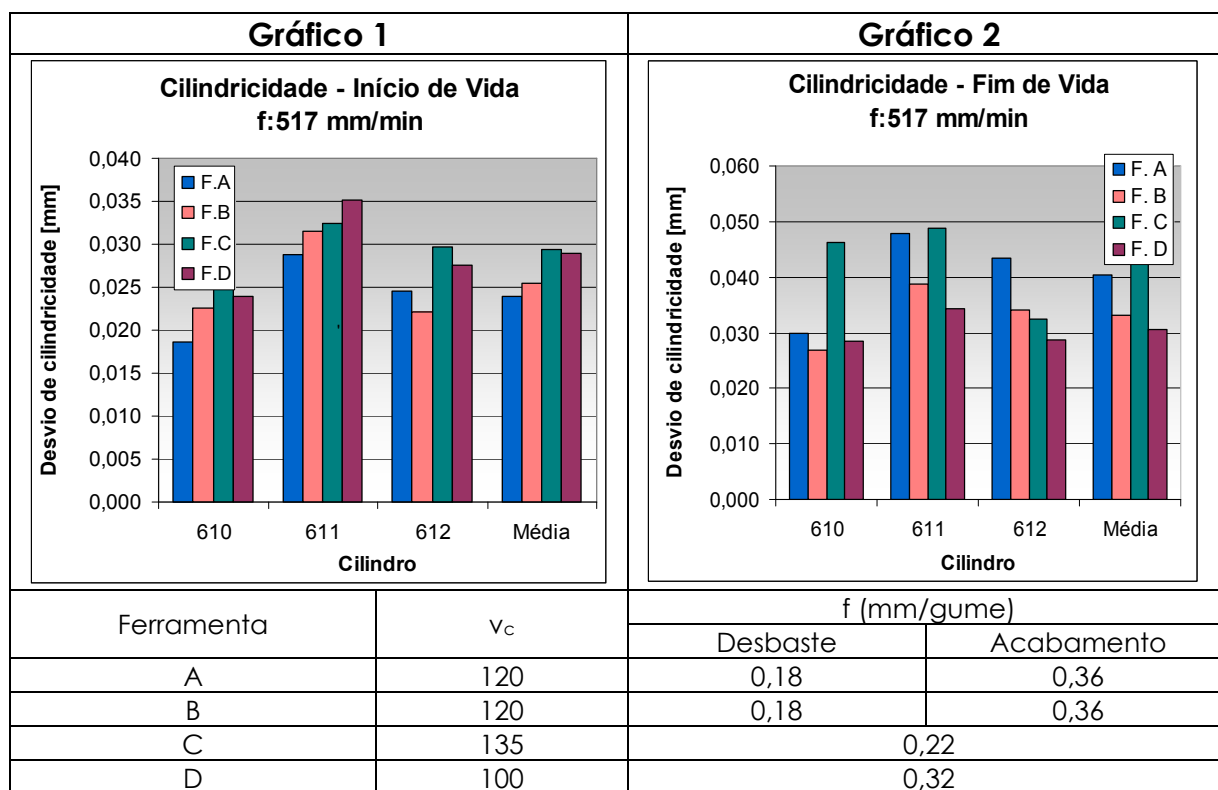


Figura 4.30 – Resultados de cilindridade das ferramentas nas condições de início e de fim de vida

Verifica-se no gráfico 1 (condição de início de vida) que os valores de cilindridade correspondentes a cada ferramenta são similares. Nas análises de circularidade e de retitude, referentes à condição de mesma produtividade, também foram verificados valores semelhantes destes desvios geométricos. Contudo, apesar de as ferramentas apresentarem valores semelhantes, verifica-se que, assim como nas análises de circularidade e retitude, com as ferramentas C e D foram obtidos os maiores erros de cilindridade. Deste modo, pode-se inferir que ferramentas que possuem insertos escalonados (ferramentas A e B) produziram os menores valores de desvio da cilindridade [22, 27].

Observa-se que os resultados de circularidade obtidos com as diferentes ferramentas seguem a mesma tendência de valores nos cilindros 610, 611 e 612, ou seja, maiores valores do desvio no cilindro 611 e menores

valores nos cilindros 610 e 612. Foi constatada nas análises de circularidade e retitude (**itens 4.4.2 e 4.4.3**) a mesma tendência dos valores, nas diversas posições de medições, para as ferramentas testadas. Para explicar essas tendências foram levantadas as hipóteses de elas estarem relacionadas às variações de rigidez e distorções na peça, provocadas pelo dispositivo de fixação. Utilizando essas hipóteses, pela análise de cilindricidade, pode-se dizer que além de existir variação de rigidez nas diversas posições do cilindro, existem variações de rigidez e distorções entre os cilindros.

Em relação à condição da ferramenta no fim de vida mostrada no gráfico 2 (**Figura 4.30**), torna-se possível realizar uma análise qualitativa, pois os critérios de fim de vida atingidos pelas ferramentas e as vidas foram diferentes. Observa-se que os melhores resultados foram obtidos com a ferramenta D. Em segundo lugar vem a ferramenta B, seguidas da A e da C. Apesar das variações dos valores, no gráfico 4 constata-se a mesma tendência dos resultados nos cilindros 610, 611 e 612. Conforme mencionado anteriormente, esta tendência nos resultados pode estar relacionada às variações de rigidez entre os cilindros e às deformações na peça provocadas pelas solicitações do dispositivo de fixação.

4.4.5 Análise dos Resultados de Tolerância Dimensional

A tolerância dimensional é um dos principais parâmetros utilizados para o controle da qualidade dos cilindros. A análise desse parâmetro permite acompanhar e avaliar quão estável é a ferramenta de mandrilar em relação à variação do diâmetro do cilindro ao longo da sua vida.

As análises dos resultados são realizadas através de comparações entre as medições de diâmetros correspondentes a cada ensaio de cada ferramenta. Nestas análises são verificados o comportamento do diâmetro para diferentes avanços, nas ferramentas A e B, e o comportamento geral de todas as ferramentas, independentemente dos parâmetros de corte com os quais as mesmas foram testadas.

Nos gráficos são apresentados a média dos resultados das medições dos 3 cilindros de cada bloco (cilindros correspondentes ao banco I) e os

intervalos de confiança para uma probabilidade de 95%, para cada peça medida. Nos gráficos apresentados, para o eixo das ordenadas o qual representa a variação do diâmetro, foi estabelecida a mesma variação da faixa de máximos e mínimos valores, com o objetivo de facilitar a comparação entre os resultados apresentados.

Visando verificar o comportamento do diâmetro para avanços diferentes, são analisados os gráficos 1 e 2 (**Figura 4.31**) e gráficos 3 e 4 (**Figura 4.32**). Os gráficos 1 e 2 correspondem aos valores de diâmetro obtidos com a ferramenta A para avanços de 1150 e 1270mm/min, respectivamente. Os gráficos 3 e 4 correspondem aos valores de diâmetros obtidos com a ferramenta B, a qual também foi submetida aos mesmos parâmetros de corte que a ferramenta A.

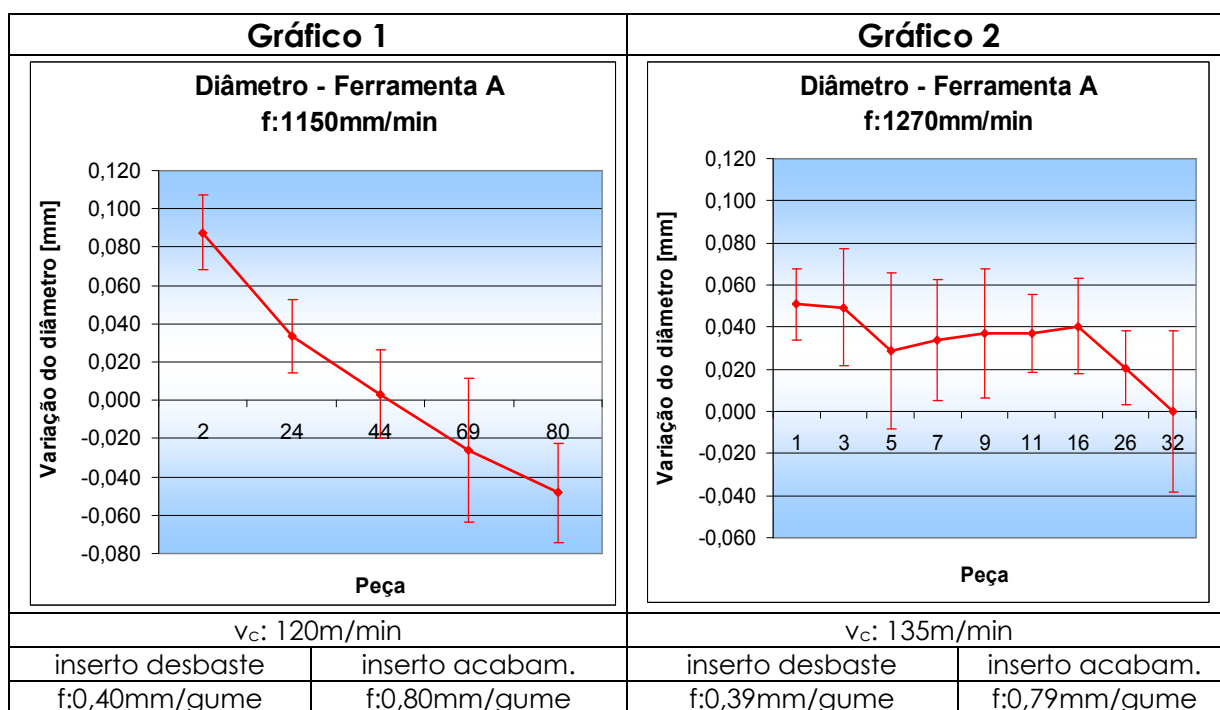


Figura 4.31 – Variação do diâmetro da ferramenta A para diferentes avanços

Comparando-se os gráficos 1-2 e 3-4, verifica-se que o aumento do avanço e da velocidade de corte provoca o aumento das dispersões dos valores. A maior diferença entre as dispersões é observada na comparação dos gráficos 3-4.

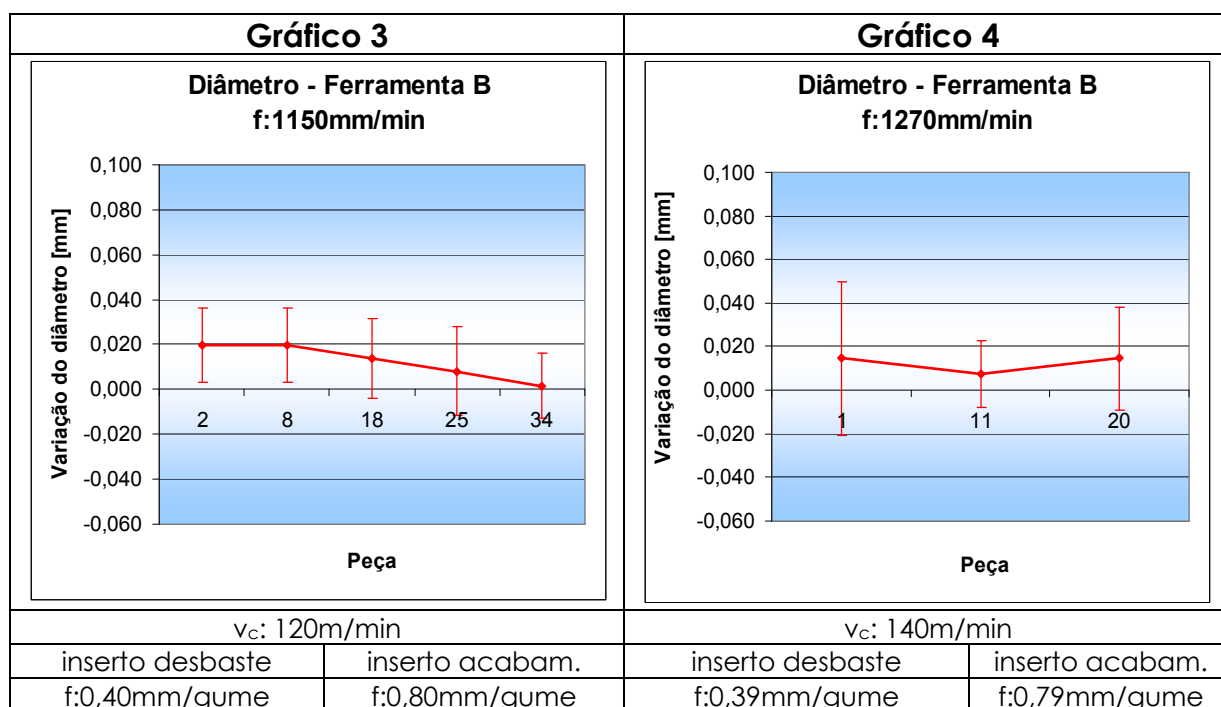


Figura 4.32 – Variação do diâmetro da ferramenta B com diferentes avanços

Pelas análises dos gráficos 1-3 e 2-4, é possível uma comparação direta entre os resultados obtidos com as ferramentas A e B. Nos gráficos 1 e 3 foram utilizados os mesmos parâmetros de corte e verifica-se que os resultados de dispersão na ferramenta B são semelhantes aos obtidos com a A. Contudo, a redução do diâmetro do cilindro do início ao fim de vida da ferramenta, estipulado em 34 peças tanto na B (gráfico 3) quanto na A (gráfico 1, parte intermediária entre as peças 24 e 44) é mais acentuada na ferramenta A. Considerando os valores dos desvios-padrão, o diâmetro com a ferramenta A pode ter uma redução de aproximadamente 0,10mm (maior valor de diâmetro menos o menor valor, encontrado no intervalo considerado), enquanto que com a ferramenta B a redução é de aproximadamente 0,05mm.

Na análise comparativa dos gráficos 2 e 4, verifica-se que as dispersões nos resultados de ambos os gráficos são semelhantes. Porém a variação no valor do diâmetro pode chegar a 0,085mm na ferramenta A e a 0,07mm na B, aproximadamente, considerando-se o mesmo número de peças usinadas em ambas as curvas.

Para análise de diâmetro obtido com as ferramentas C e D são mostrados na **Figura 4.33** os resultados das medições. No gráfico 5 são

apresentados os resultados correspondentes à ferramenta C, a qual foi testada com os parâmetros de avanço 517mm/min e velocidade de corte de 135m/min. No gráfico 6 são apresentados os resultados correspondentes à ferramenta D testada com os parâmetros de avanço de 640mm/min e velocidade de corte de 100m/min.

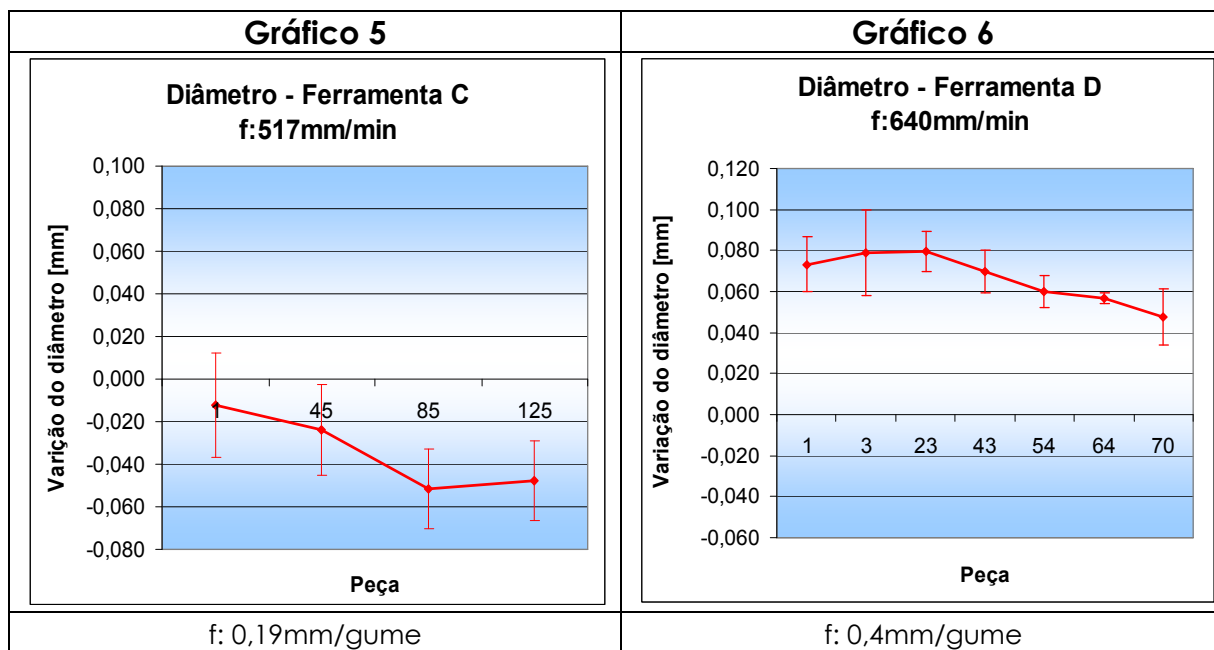


Figura 4.33 – Variação do diâmetro das ferramentas C e D

Em relação aos gráficos 5 e 6, pode-se verificar que a ferramenta D (gráfico 6) foi a que apresentou os menores valores de dispersão e de variação do diâmetro ao longo sua vida. Com esta ferramenta foi obtida a variação máxima no diâmetro de aproximadamente 0,07mm, considerando-se as dispersões dos valores medidos.

No gráfico 5, verificam-se valores de dispersão e variação dos valores do diâmetro da ferramenta C compatíveis aos das ferramentas A e B que utilizaram avanço superior em aproximadamente 100% (1150mm/min das ferramentas A e B contra 517mm/min da ferramenta C). É possível que este resultado esteja relacionado à ausência de insertos escalonadas nesta ferramenta e gumes secundários atuantes como elementos de guia, os quais proporcionam maior estabilidade à ferramenta (vide **item 2.10.2**).

Considerando os parâmetros de corte com os quais as ferramentas foram testadas e os resultados dos diâmetros, percebe-se que as diferenças construtivas das ferramentas interferem nas variações dos valores dos

diâmetros e das dispersões dos valores ao longo da vida. Em uma análise qualitativa onde é considerado o ponto nas curvas dos gráficos 1, 3, 5 e 6 de 34 peças usinadas (número máximo de peças obtidas com a ferramenta B), pode-se constatar que com a ferramenta D foi possível obter os menores valores de dispersão e variação do diâmetro que às demais ferramentas (variação do diâmetro, somado aos valores das dispersões, de aproximadamente 0,04mm). Em segundo lugar foram obtidos os melhores resultados com a ferramenta B, com variação de aproximadamente 0,05mm, seguidos das ferramentas C, com variação aproximada de 0,055mm e a ferramenta A, com variação aproximada de 0,11mm.

Contudo, apesar de existirem diferenças entre os resultados de dispersão e variação do diâmetro, todas as ferramentas produziram peças dentro das tolerâncias estipuladas em projeto até atingir a condição de fim de vida.

4.5 Análise da Produtividade e da Vida

Os constantes desenvolvimentos e pesquisas na usinagem do ferro fundido vermicular buscam melhores resultados de vida da ferramenta e de produtividade.

Anteriormente aos ensaios, o avanço utilizado no mandrilamento dos cilindros era de 517mm/min. Nestes ensaios, com as ferramentas A e B foram possíveis utilizar avanços de 1150 e 1270mm/min. Com a ferramenta D foi possível utilizar avanço de 640m/min e com a C, 517mm/min.

As ferramentas A e B apresentam o escalonamento dos insertos, ao contrário das demais. Possivelmente esta característica geométrica tenha proporcionado às ferramentas A e B a estabilidade necessária para serem utilizadas com maiores avanços em relação às demais. Segundo um estudo realizado pela Ingesoll Werkzeuge Gmbh [22], com diferentes concepções de ferramentas de mandrilar, os melhores resultados em relação à produtividade foram obtidos com as ferramentas escalonadas. Em outro estudo realizado pela Komet Präzisionswerkzeuge [47], os melhores resultados de produtividade também foram obtidos com ferramentas escalonadas.

O menor avanço utilizado pelas ferramentas A e B (1150mm/min) representa um acréscimo de aproximadamente 120% no avanço normalmente utilizado na produção (517mm/min). O maior avanço (1270mm/min) representa um acréscimo de aproximadamente 145%.

Considerando os tempos secundários de movimentação e troca de ferramenta na usinagem dos cilindros, os tempos de mandrilamento tiveram uma redução de aproximadamente 50%, em relação ao que era praticado anteriormente aos ensaios.

Conforme mencionado anteriormente (vide **item 4.4.2b**), com a ferramenta C não foi possível aumentar o avanço acima de 517mm/min, devido à intensa vibração. Uma das hipóteses para explicar o surgimento de tais vibrações é a ausência de elementos de guia na ferramenta. Esta é a principal diferença construtiva observada nas ferramentas A, B e D em relação à ferramenta C.

Já a ferramenta D teve o avanço limitado pelo número de insertos (4). Tal característica limitou o avanço utilizado nesta ferramenta a 640mm/min.

Em relação à vida da ferramenta, com a ferramenta de produção (ferramenta anterior aos ensaios) a vida era de aproximadamente 50 blocos. Com a ferramenta A (80 blocos usinados) foi possível um aumento de aproximadamente 60%. Com a ferramenta B (34 blocos usinados) ocorreu uma redução na vida em cerca de 32%. Com as ferramentas C e D houve um aumento de aproximadamente 170% e 40%, respectivamente.

A variação na vida obtida pelas ferramentas A e B, possivelmente é devido à ausência de chanfro ou raio maior na quina do inserto (vide **Figura 4.4**), pois esta foi a principal diferença construtiva verificada entre estas ferramentas.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O estudo de diferentes concepções de ferramentas no mandrilamento de ferro fundido vermicular foi baseado nas análises das curvas de potência, nas análises dos desvios de forma de circularidade, de retitude e de cilindricidade, na análise da tolerância dimensional, na produtividade e na vida das ferramentas. O comportamento de cada ferramenta aliado às características construtivas de cada uma permitiu identificar elementos construtivos que influenciaram os pontos analisados. As conclusões obtidas em cada análise são apresentadas a seguir

5.1.1 Análise das Curvas de Potência

Nesta análise foi possível verificar o comportamento das curvas de potência para diferentes avanços e geometrias de ferramentas.

Em virtude da disponibilidade de potência na máquina-ferramenta e devido ao fato de um aumento do avanço resultar em maior produtividade, é possível aumentar o avanço no mandrilamento.

Em relação à análise de diferenças construtivas das ferramentas, pôde ser observado que a geometria da ferramenta influencia a velocidade de desgaste do inserto. A geometria do inserto aliada às características geométricas da ferramenta está diretamente ligada às solicitações mecânicas e às forças às quais o mesmo está submetido. Nas ferramentas A e B, apesar de ambas possuírem características construtivas semelhantes, pode-se concluir que o chanfro da quina da ferramenta A foi o responsável por valores de potência mais constantes ao longo da vida, além de proporcionar maior vida em relação aos insertos de desgaste da ferramenta B.

5.1.2 Análise dos Desvios Geométricos

Através da análise dos desvios geométricos, pode-se concluir que as diferenças nas concepções das ferramentas e das diferentes condições de

corte interferem na qualidade geométrica relacionada aos desvios de forma de circularidade, retitude e cilindridade dos cilindros. Além das diferenças construtivas das ferramentas, verifica-se que o desgaste das mesmas também gera influência sobre os desvios de forma analisados, pois na condição de fim de vida ocorre o aumento dos valores em todas as condições de corte para todas as ferramentas.

a) Circularidade

Na análise para diferentes valores de avanço, conclui-se que o avanço não influencia o desvio de circularidade. Apesar das diferenças dos valores de avanço testados em cada ferramenta terem sido de aproximadamente 23% (ensaio com a ferramenta D) e 120% (ensaio com as ferramentas A e B) em relação ao avanço normal de produção (517mm/min), as variações observadas na circularidade não foram significativas.

Para diferentes velocidades de corte foram obtidos comportamentos totalmente diferentes entre as ferramentas analisadas (ferramentas A e B). Com a ferramenta A foi observada a redução do desvio de circularidade com o aumento da velocidade de corte. Com a ferramenta B foi verificado o aumento do desvio de circularidade com o aumento da velocidade de corte. Conclui-se que a melhora ou a piora do desvio de circularidade com a variação da velocidade de corte está diretamente relacionada à característica geométrica da ferramenta.

Na análise de circularidade na condição de mesma produtividade, foi observado que com as ferramentas que possuem insertos escalonados (ferramentas A e B) foram obtidos melhores resultados de circularidade que com as demais (ferramentas C e D).

Apesar das diferenças dos resultados obtidos com as diferentes ferramentas, estes apresentaram a mesma tendência dos valores ao longo das posições de medições. Tal comportamento permite afirmar que existe influência dos esforços provocados pelo dispositivo de fixação da peça ou

de variações de rigidez dos cilindros sobre a qualidade de circularidade dos cilindros.

b) Retitude

Na análise para diferentes avanços foi verificado que o aumento do avanço ocasiona o aumento do desvio de retitude, tanto na condição de início quanto na de fim de vida das ferramentas A e B. Já a ferramenta D segue a mesma tendência de comportamento apenas na condição de fim de vida. Para esta ferramenta, na condição de início de vida, menores valores do desvio de retitude foram obtidos com o maior avanço. Conclui-se que, apesar de existir uma tendência para o aumento do desvio de retitude com o aumento do avanço, a concepção construtiva da ferramenta pode levar à diferentes resultados.

Em relação à análise para diferentes velocidades de corte, foram encontrados resultados pouco conclusivos. Na condição de início de vida, tanto com a ferramenta A quanto com a B, foram obtidos valores do desvio de retitude ora maiores ora menores para as diferentes posições de medição.

Para a condição de mesma produtividade pôde ser constatada a influência das características construtivas das ferramentas. Os resultados obtidos com as ferramentas foram de encontro à teoria. A ferramenta D, que possui elementos de guia e ausência de insertos escalonados, foi a que apresentou os maiores erros de retitude. A ferramenta C, que não possuía elementos de guia e insertos escalonados, gerou o segundo pior resultado de retitude. As ferramentas A e B que possuem insertos escalonados foram as que produziram os menores valores de retitude.

A mesma tendência dos resultados obtidos com as ferramentas nas diferentes posições de medição leva à conclusão que o dispositivo de fixação da peça e ou variações na rigidez das paredes dos cilindros influenciam nos resultados de retitude.

c) Cilindricidade

Em relação à análise para diferentes avanços, foi verificado o aumento dos valores de cilindridade com o aumento dos valores de avanço. Com a ferramenta D foram realizados ensaios com pequenas variações no valor do avanço (517mm/min e 640mm/min). Através dos resultados desta ferramenta, conclui-se que no mandrilamento pequenas variações no avanço já resultam em aumento dos desvios de cilindridade dos cilindros.

Na análise de cilindridade para diferentes velocidades de corte, foram obtidos maiores valores do desvio de cilindridade na condição de menor velocidade de corte. Tal resultado vai em desconformidade à teoria de que o aumento da velocidade de corte contribui para o aumento de vibrações, deformações e desbalanceamento da máquina ferramenta. Por outro lado vai de encontro ao fato de que o aumento da temperatura reduz a força de corte, deformações e, assim, o erro.

Para a condição de mesma produtividade foram verificados maiores valores de cilindridade obtidos com as ferramentas C e D. Conclui-se que ferramentas que possuem insertos escalonados (ferramentas A e B) levam a melhores resultados de cilindridade.

Assim como na circularidade e na retitude, foram observados a mesma tendências de resultados de cilindridade obtidos com as diferentes ferramentas. Nas medições de circularidade e retitude observa-se que existem variações de rigidez do cilindro e deformações impostas pelo dispositivo de fixação da peça nas diferentes posições de medição do cilindro. Nos resultados de cilindridade conclui-se que existem variações de rigidez e deformação entre os cilindros.

5.1.3 Tolerância Dimensional

Na análise de tolerância dimensional pode-se concluir que o aumento do avanço ocasiona o aumento das dispersões no valor diâmetro. Verifica-se também forte influência da característica geométrica da ferramenta sobre a variação dos valores do diâmetro ao longo da vida da mesma. Foi

constatada a menor variação de diâmetro com a ferramenta D (variação de aproximadamente 0,04mm) e a maior com a ferramenta A (variação de aproximadamente 0,11mm), considerando-se a mesma quantidade de peças usinadas com as ferramentas.

5.1.4 Análise da Produtividade e da Vida

As ferramentas escalonadas foram capazes de reduzir em cerca de 50% os tempos de mandrilamento, considerando os tempos de usinagem praticados anteriormente aos ensaios.

Em relação à vida, tanto com as ferramentas escalonadas quanto com as não escalonadas foram conseguidos aumento na vida da ferramenta de 40 a 170%, quando comparadas à vida média da ferramenta anterior aos ensaios.

A utilização de um raio de quina pequeno na ferramenta B possivelmente foi o fator que levou esta ferramenta a atingir uma vida inferior, em relação às demais.

De todas as análises realizadas conclui-se que a ferramenta A é a ferramenta mais adequada para a aplicação no mandrilamento de desbaste dos cilindros. Juntamente com a ferramenta B, com a ferramenta A foram obtidos os menores valores dos desvios de forma e os maiores valores de avanço linear. A ferramenta B fica em desvantagem em relação à ferramenta A no quesito vida. Apesar da ferramenta A ter apresentado vida em valores inferiores aos obtidos com as ferramentas C e D, com estas não foi possível um aumento considerável do avanço linear, gerando produtividade igual ou muito próxima da produtividade com a ferramenta normal de produção. Tem-se assim, a ferramenta A como sendo a melhor opção para a aplicação no mandrilamento de desbaste dos cilindros de blocos de motores.

Conforme mencionado na introdução, este trabalho foi desenvolvido em um projeto de parceria com uma indústria de Santa Catarina e com a UFSC. Assim sendo, o ambiente de produção fabril na maioria das vezes apresenta algumas dificuldades para a realização de ensaios, repetições,

testes com diferentes parâmetros etc., já que para a execução são necessárias mudanças que atrapalham a produção e a estabilidade da linha produtiva.

Em função desta situação, este trabalho foi direcionado a uma tentativa de fornecer informações que pudessem trazer esclarecimentos e conclusões fundamentadas, na medida do possível, sobre a influência das concepções das ferramentas na qualidade de forma e dimensional, na produtividade e na vida das ferramentas.

5.2 Sugestões

A seguir encontram-se algumas sugestões de trabalhos que poderiam complementar a presente pesquisa:

- Desenvolvimento de novos dispositivos de fixação da peça, que minimizem os desvios de forma gerados pelas solicitações mecânicas impostas sobre a peça.
- Desenvolvimento de ferramentas de mandrilar capazes de eliminar a operação de pré-acabamento, deixando a peça com as tolerâncias de forma e dimensional conforme o requerido em projeto.
- Análise dos modos de vibração do conjunto peça/dispositivo-de-fixação para avaliar as faixas de velocidades de corte a ser utilizadas para se evitar problemas de vibração.
- Otimização do sobremetal dos cilindros com o objetivo de aumentar a vida da ferramenta.

Sugere-se estudos complementares de otimização dos *layouts* das ferramentas, pois, conforme observado neste presente estudo, o desenvolvimento e a evolução de novas idéias na caracterização das ferramentas permitem melhores resultados de produtividade, vida e qualidade das peças.

6 REFERÊNCIAS

- [1] TRANSPORTES. **História do automóvel**. Disponível em: <www.transportes.gov.br/bit/estudos/vantagens/vantagens-transportes.doc>. Acesso em 11 de novembro de 2006.
- [2] ANFAEVA. **Automóvel 50 anos**. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/50anos/8.pdf>>. Acesso em 15 de outubro de 2006.
- [3] BASTOS, C. M. **Modelagem e simulação do processo de torno-brochamento de virabrequins**. 2005. 137f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [4] **Todo motor**. Disponível em: <<http://www.todomotor.escl/imagenes/corvette/jpj>>. Acesso em 7 de junho de 2006.
- [5] WARE HOUSE. **Competition**. Disponível em: <<http://www.competition.warehouse.usa.com>>. Acesso em 7 de junho de 2006.
- [6] ANDRADE, C. L. F. **Análise de furação do ferro fundido vermicular com brocas de metal-duro com canais retos revestidas com TiN e TiAlN**. 2005. 171f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [7] DAWSON, S., et al. **The mechanical and physical properties of compacted graphite iron**. In: GLOBAL POWERTRAIN CONGRESS. 1. 1998, Detroit. **Annals**. . . Detroit: AISI, 1998.
- [8] DAWSON, S. **Compacted graphite iron: mechanical and physical properties for engine design**. In: CONFERENCE ON MATERIALS IN POWERTRAIN, VDI. , 1999, Dresden. **Annals**. . . Dresden, 1999.
- [9] GODINHO, A. F. C. E.; BAGETTI J.; DORÉ C. **Otimização do mandrilamento de cilindros de blocos de motor**. Florianópolis: UFSC , 2006. 80 p. (1º Relatório Interno, Projeto Verde-Amarelo).
- [10] MAHLE. **Motores especiais**. Disponível em: <www.mahle.com.br>. Acesso em 15 de março de 2005
- [11] ALBERTAZZI, A. Jr. **Metrologia Parte 1, Apostila**, Florianópolis, UFSC, 2002. 132p.

- [12] SCHMIDT, A. **Aspectos da filtragem na medição de circularidade em Máquinas de medir por coordenadas utilizando scanning**. 2005. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [13] HUMIENNY, Z.; OSANNA, P. H.; TAMRE, M., et al. **Geometrical Product Specifications - Course for Technical Universities**, 1ª ed. Warszawa. 2001.
- [14] SOARES, G. G.; MARQUES, C. C. In: WORKSHOP DE MEDIÇÃO DE FORMA. **Anais...** Florianópolis: Fundação Certi, UFSC, 2002.
- [15] AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C.; LIRANI, J. **Princípios de engenharia de fabricação mecânica**. 6. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1995. 295 p.
- [16] DRAKE, P. J. **Dimensioning and tolerancing handbook**. New York: McGraw-Hill 1999.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 6409: Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho**. Rio de Janeiro, 1997.
- [18] KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Tecnologia da Usinagem com Ferramentas de Corte de Geometria Definida** – parte 1. Traduzido e adaptado por Rolf Bertrand Schroeter e Walter Lindolfo Weingaertner do livro "Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen". 2001.
- [19] FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1986.
- [20] STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte I**. 4. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 1995.
- [21] CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 5. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1982. 518 p.
- [22] EQUIPE TÉCNICA DA INGERSOLL WERKZEUGE GmbH. Ferro fundido vermicular: avanços na usinagem. **Revista Ipesi Metal-Mecânica**. São Paulo, p 63-65, nov. 2004.
- [23] PUC. **Análise de metais ferrosos**. Disponível em: <http://www.dcmmm.puc-rio.br/bancodeimagens/eletronico/metais/liga_ferrosas/ferros_fundidos/fer_fund.html>. Acesso em 13 de setembro de 2005.

- [24] DAWSON, S.; SCHROEDER, T. **Practical applications for Compacted Graphite Iron**. American Foundry Society, 2004.
- [25] MOCELLIN, F. et al. Study of the Machining of Compacted Graphite Iron for Drilling Process. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**, v. XXVI, p. 22-27, 2004.
- [26] GUESSER, W. L. Usinagem de Ferros Fundidos Cinzento, Nodular e Vermicular. In: **Tecnologias Avançadas de Manufatura**. 1º Edição. Editora Novos Talentos. 2005, p. 65-88.
- [27] SAHM, A.; ABELE, E.; SCHULZ, H. **State of the art in CGI machining**. In: COMPACTED GRAPHITE IRON MACHINING WORKSHOP, 2002, Darmstadt. **Annals**. . . Darmstadt, 2002.
- [28] DAWSON, S., et al. **The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron**. Society of Automotive Engineers, 2001, p. 41-59.
- [29] XAVIER, F. A. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN**. 2003, 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- [30] MOCELLIN, F. **Estudo da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaios de Furação**. 2002. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- [31] REUTER, U.; SCHULZ, H. Compact and bijou: The problems associated with compacted graphite iron manufacturing can be overcome. **Engine Technology International**, v. 4, p. 58-60; 1999.
- [32] ZHOUT, C.; WYSK, R. A. An integrated system for selecting optimum cutting speeds and tool replacement times. **Int. J. Mach. Tools Manufact.** Vol. 32, Nº 5, P. 695-707, 1992.
- [33] MARKUS, W. **Aspectos tecnológicos da minimização e eliminação do fluido de corte no processo de torneamento com insertos de metal-duro revestidos com TiN**. 2001. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - D Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [34] SANDVIK. **Modern metal cutting: a practical handbook**. 1. ed. Depto Technical Sandvik Coromant, 1994. 500 p.
- [35] SCHROETER, R. B. **Alargamento de precisão em alumínio aeronáutico com ferramentas de gume único regulável**. 1989. 166 f.. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1989.

- [36] **Tool and production.** Disponível em:
<<http://www.toolingandproduction.com>>. Acesso em 8 de julho de 2005.
- [37] **Sandvik coromant.** Disponível em:
<<http://www.coromant.sandvik.com>>. Acesso em 8 de julho de 2005.
- [38] SAMPOSS. **Produtos.** Disponível em:
<http://www.sanposs.com.br/pt/produtos_fermandrilhar.asp>. Acesso em 8 de julho de 2005.
- [39] INGERSOLL. Aumento de produtividade no mandrilamento de cilindros em ferro fundido vermicular. **Revista IDR Industrial Diamond Review.** São Paulo, p. 26-27, fev. 2004.
- [40] MÜHLE, H. B. **Mandrilamento com cabeçotes de excentricidade regulável e sistema de balanceamento.** 2000. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
- [41] SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L. **Processos de usinagem e ferramentas de corte: nível 1, parte 2.** Laboratório de Mecânica de Precisão - UFSC. 2001. 213 p.
- [42] FLOYD, T. O. **Manufacturing engineering handbook.** Warren Michigan: Hole-Making, chapter 28 Hole Making.
- [43] SCHROETER, R. B.; WEINGAERTNER, W. L., et al. **Otimização do processo de furação e acabamento guias de válvulas.** Florianópolis: UFSC, 2004. 80 p. (2º Relatório Interno – Projeto Verde-Amarelo).
- [44] AGAPIOUT, J. S. **Design Characteristics of New Types of Drill and Evaluation of Their Performance Drilling Cast Iron – I, Drill with Four Major Cutting Edges.** Machining Systems Department, Advanced Engineering Staff, General Motors Technical Center, Warren, U.S.A. July 1992.
- [45] CUTTING TOOL ENGINEERING MAGAZINE. Cutting tool engineering article. V. 52, n. 6, jun. 2000.
- [46] AN ARNOLD PUBLICATION. West manufacturing case study. V.xx, n. 5, jun 2002.
- [47] KRUYNSKY, J.; LEUTZER, P.; **Multi-teeth boring of CGI with high performance and accuracy.** In: COMPACTED GRAPHITE IRON MACHINING WORKSHOP, 2002, Darmstadt. Annals. . . Darmstadt, 2002.

- [48] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDIZATION. **ISO 12180-1:** Geometrical product specification (GPS) – Cylindricity – Part 1: Terms, definitions and parameters of cylindrical form. Switzerland, 2001.
- [49] MONTGOMERY, D.; RUNTER, G. **Applied statistics and probability for engineers**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998, 625p.
- [50] DINIZ, A. E. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Editora Líber, 2000. 256 p.
- [51] RAHMAN, M.; SEAK, K. H. W.; GOH, T. N., et al. A study on the appropriate usage of different tool materials. **Journal of Materials Processing Technology**, 29-1992.
- [52] BEZERRA, A. A.; MACHADO, A. R.; SOUZA, A. M.; EZUGWU, E. O. effects of machining parameters when reaming aluminium-silicon (SAE 322) alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v.112, p. 185-198, 2001.
- [53] CASTILLO, W. J. G. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos**. 2005. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- [54] ECKHARDT, M. **Utilização de alargadores de gume único regulável para a obtenção de furos de precisão**. 1993. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.
- [55] CASTRO, P. **Aspectos tecnológicos da usinagem a seco com mínima quantidade de fluido de corte na furação com broca helicoidal**. 2001. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [56] LIN, S. C.; TING, C. J. Tool wear monitoring in drilling using force signals. **Elsevier**. Wear, v. 180, p. 53-60, 1994.
- [57] SANTOS, R. G. **Avaliação do processo de alargamento de guias de válvulas**. 2004. 107 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- [58] MICHELETTI, G. F. **Mecanizado por arranque de viruta**. 2. ed. Barcelona: Editoria Blume, 1980. 426 p.
- [59] CSELLE, T. Carbide drills: ate the peak of development. Ratio drills and their applications, 1114 p., 2002.
- [60] KIM, D.; RAMULU, M. Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks. Composite Structures, v. 63, p. 101-114, 2004.

- [61] UFSC. **Como fazer referências: bibliográficas, eletrônicas e demais formas de documentos**. Disponível em: < www.bu.ufsc.br >. Acesso em 10 de Fevereiro 2007.